

SESSION 2024

**AGREGATION
CONCOURS EXTERNE**

Section : SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR

**Option : SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR
ET INGÉNIERIE ÉLECTRIQUE**

**CONCEPTION PRÉLIMINAIRE D'UN SYSTÈME,
D'UN PROCÉDÉ OU D'UNE ORGANISATION**

Durée : 6 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	Section/option	Epreuve	Matière
EAE	1415A	103	1268

Définition de l'épreuve

À partir d'un dossier technique comportant les éléments nécessaires à l'étude, l'épreuve a pour objectif de vérifier les compétences d'un candidat à synthétiser ses connaissances pour proposer ou justifier des solutions de conception et d'industrialisation d'un système technique dans le domaine de la spécialité du concours dans l'option choisie.

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 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

Ce sujet comporte 31 pages :

- la présentation du sujet et ses questions (pages 2 à 21) ;
- les documents techniques DT1 à DT5 (pages 22 à 27) ;
- les documents réponses, DR1, DR2 et DR3 (pages 28 à 31), à compléter et à rendre avec la copie.

Il est constitué de deux parties indépendantes :

- Partie A – Conception de l'unité de valorisation énergétique
- Partie B – Conception du réseau express régional

Territoires intelligents et durables

Une ville intelligente et durable est une ville novatrice qui utilise les technologies de l'information et de la communication et d'autres moyens structurels pour améliorer la qualité de vie, l'efficacité de la gestion urbaine ainsi que sa compétitivité tout en respectant les besoins des générations actuelles et futures dans les domaines économique, social, environnemental et culturel.

Mise en situation

Au cours des dernières décennies, l'évolution rapide des technologies de l'information et de la communication a engendré des transformations majeures dans nos sociétés, avec des implications profondes pour le développement urbain. Dans ce contexte, les concepts de "territoires intelligents" et de "smart cities" ont émergé en tant que solutions novatrices pour relever les défis urbains actuels et futurs. Les territoires intelligents visent à intégrer les technologies numériques, les infrastructures durables et les services innovants afin de créer des environnements urbains plus efficaces, résilients et axés sur la qualité de vie des citoyens.



L'essor des territoires intelligents repose sur l'idée que les technologies de pointe peuvent jouer un rôle clé dans la résolution des problèmes urbains, tels que la congestion, la pollution, l'accès aux services, et bien d'autres encore. Les smart cities, qui sont des villes utilisant ces technologies de manière systématique, sont devenues des laboratoires vivants où des expérimentations sont menées pour repenser l'urbanisme, la gouvernance et les modes de vie. Cependant, malgré leur potentiel, les territoires intelligents et les smart cities sont confrontés à divers défis. L'un des principaux obstacles est la fragmentation des initiatives et des solutions mises en œuvre à travers le monde. En effet, chaque ville ou région adopte souvent ses propres approches, normes et technologies, ce qui entrave la mise en place d'un cadre cohérent et harmonisé. Pour que les territoires intelligents puissent véritablement atteindre leur plein potentiel, il est essentiel de développer des normes et des protocoles de standardisation qui favorisent l'interopérabilité, l'échange de données et l'adoption de bonnes pratiques.

Depuis 2016 la norme internationale fondamentale ISO 37101, intitulée "Systèmes de management pour le développement durable des communautés - Exigences et lignes directrices", vise à fournir les lignes directrices et les exigences pour la création, la mise en

œuvre, la maintenance et l'amélioration continue d'un système de gestion des territoires. Les quatre critères de dimensionnement suivants sont extraits de sa norme d'application ISO 37120, intitulée "Indicateurs du développement durable des communautés" :

Thèmes	Besoins	Indicateurs de performance
Energie	<p>Consommation totale d'énergie électrique résidentielle par habitant (kWh-an⁻¹)</p> <p>Pourcentage de l'énergie totale provenant de sources renouvelables, par rapport à la consommation totale d'énergie de la ville</p>	<p>Énergie thermique (% du mix énergétique total)</p> <p>Énergie électrique (% du mix énergétique total)</p> <p>Capacité d'approvisionnement en électricité en pourcentage de la demande d'électricité de pointe</p>
Environnement	<p>Émissions de gaz à effet de serre mesurées en tonnes par habitant</p>	<p>Concentration de NO2 (dioxyde d'azote)</p> <p>Concentration de SO2 (dioxyde de soufre)</p> <p>Concentration de O3 (ozone)</p>
Déchets solides	<p>Total des déchets solides municipaux collectés par habitant</p> <p>Pourcentage des déchets solides de la ville qui sont recyclés</p>	<p>Pourcentage des déchets solides de la ville éliminés dans un incinérateur</p> <p>Pourcentage de la quantité totale de déchets dans la ville qui est utilisée pour produire de l'énergie</p>
Transport	<p>Kilomètres de système de transport public à grande capacité pour 100 000 habitants</p> <p>Nombre annuel de trajets en transports publics par habitant</p> <p>Nombre d'automobiles personnelles par habitant</p>	<p>Pourcentage de personnes utilisant un mode de déplacement autre qu'un véhicule personnel</p> <p>Pourcentage de lignes de transport public équipées d'un système en temps réel</p> <p>Pourcentage de trajets en transports publics effectués à l'heure prévue</p>

L'objet de cette épreuve sera de concevoir certains composants de l'unité de valorisation énergétique (UVE) des déchets et du nouveau réseau express régional (RER) afin de mettre en corrélation la base de production locale décentralisée d'énergie électrique et son principal poste de consommation.

Le territoire étudié est situé en France métropolitaine (46°N, 3°E). Il comprend 300 000 habitants répartis à parts égales :

- 150 000 habitants sur une surface de haute densité, la métropole de 10 km de diamètre ;
- 150 000 habitants sur une surface de faible densité de 50 km de diamètre moins le centre-ville.

PARTIE A : Conception de l'unité de valorisation énergétique

L'objectif de cette partie est de valider le choix des composants de l'usine d'incinération des ordures ménagères (figure 1) pour obtenir un traitement conforme aux exigences attendues de l'ISO 37120 et de définir la puissance du talon de production dans le mix énergétique du territoire.

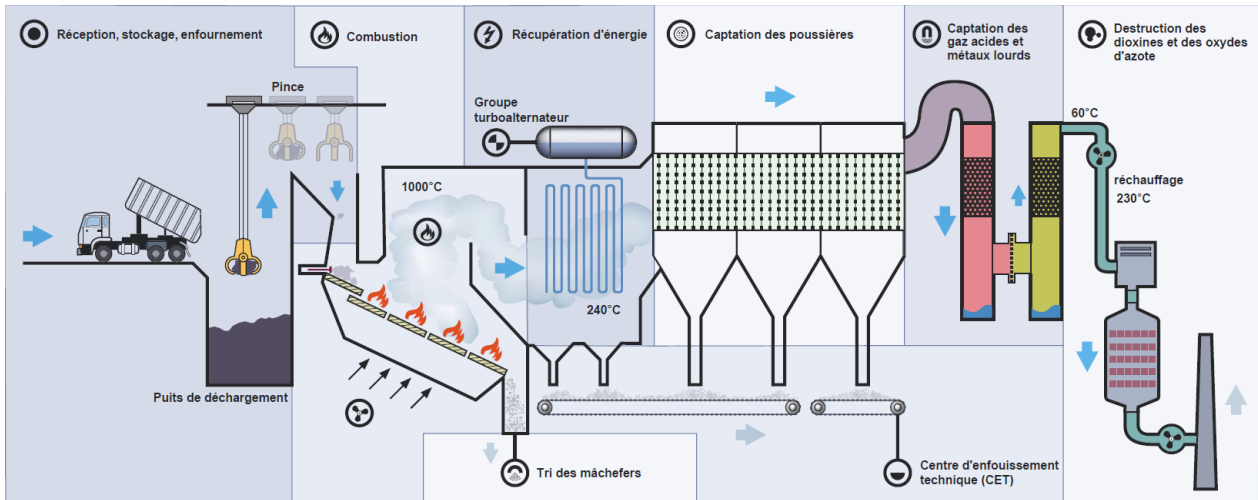


Figure 1 Synoptique général d'une unité de valorisation énergétique

A.1. Dimensionnement de la ressource

Dans l'extrait de son rapport annuel sur l'état des lieux de la composition nationale des déchets en 2022 disponible en DT1, l'ADEME décrit le flux des déchets en France métropolitaine.

Question 1 : À l'aide du DT1, calculer la masse de déchets valorisables par incinération produite par habitant et par an.

Le pouvoir calorifique inférieur (PCI) de ces déchets incinérables est très variable et sa gestion est encore assurée par l'œil humain : un opérateur alimente les fours à l'aide de la pince en choisissant de piocher dans le puits de déchargement afin de conserver une température de four la plus stable possible (figure 2).

Apporteurs	Type de déchets	Contrat d'apport annuel (t.an ⁻¹)	PCI (MWh.t ⁻¹)
Métropole	Ordures ménagères résiduelles	106300	2,31
Apport DASRI	Déchets d'activités de soins à risques infectieux	7340	6,04
Centre de tri	Déchets industriels banals	19560	4,06

Figure 2 Tableau de gestion des apports de l'UVE pour 2022

Question 2 : Calculer le PCI moyen des déchets traités par l'UVE en 2022.

Question 3 : Calculer alors la ressource énergétique primaire annuelle disponible sur le territoire E_p .

L'usine d'incinération fonctionne 7 800 heures par an et ne s'arrête que pour ses phases de maintenance.

Question 4 : Calculer le débit massique horaire moyen de déchets incinérés en $t \cdot h^{-1}$ ainsi que la puissance disponible à l'entrée des fours P_f en MW.

A.2 Dimensionnement des échangeurs

Il s'agit de déterminer les parts du gisement réservées à la production de chaleur et d'électricité. Pour des critères d'éco-conception, le fluide caloporteur retenu sera l'eau. Le synoptique détaillé du circuit hydraulique d'une UVE est fourni au DT2.

Une machine thermique, le groupe turbo alternateur (GTA) est implantée entre le collecteur haute pression et les aérocondenseurs dont les températures sont supposées constantes. Pour limiter la corrosion des structures et donc la maintenance du site, le cycle de Rankine sans surchauffe de la vapeur sèche est retenu. La vanne PV10702 qui permet le maintien en température des radiateurs de l'aérocondenseur sera considérée fermée PV10702 [0 %].

Question 5 : À l'aide du DT2, compléter l'allure du cycle de Rankine sur le diagramme enthalpique de l'eau (P,E) du DR2. Le trajet de la vapeur pour ce cycle est représenté par des flèches, la détente dans la turbine est supposée adiabatique et donc isentropique, et la condensation dans les aérocondenseurs isobare, la vanne PV10701 est ici considérée fermée PV10701 [0 %].

Question 6 : À partir des relevés du DR2, en supposant que la chaudière a un rendement moyen $\eta_c = 86 \%$, et en prenant pour puissance moyenne disponible à l'entrée des fours P_f obtenue à la question 4, calculer d_{HP} le débit massique horaire de vapeur sèche disponible au collecteur Haute Pression.

L'apparition de gouttes dans la turbine lors de la détente augmente les frottements et diminue le rendement. Le soutirage de ce liquide vers le collecteur moyenne pression (MP) est donc nécessaire et permet une cogénération.

Le réchauffeur du four et le traitement thermique des fumées consomment $d_{HF} = 8 t \cdot h^{-1}$ de vapeur haute pression.

Question 7 : En supposant que le rendement de la turbine au débit maximal reste constant $\eta_t = 74 \%$, proposer et justifier par le calcul un dimensionnement de la puissance de l'alternateur du GTA.

Lors des périodes de chauffe d'octobre à avril en France métropolitaine, l'ouverture partielle de la vanne PV10701 permet à l'UVE de fournir de l'énergie thermique supplémentaire au réseau de chaleur urbain (RCU) qui alimente les 150 000 habitants de la métropole. Dans la configuration étudiée, la centrale reste autosuffisante en électricité et la puissance en sortie de turbine est $P_{t \min} = 1,2 \text{ MW}$.

Question 8 : En utilisant les points de mesure du DT2, représenter l'échangeur du RCU dans le cycle thermodynamique du DR2. En considérant que l'efficacité des échangeurs thermiques reste constante $\eta_{rcu} = 66 \%$ quel que soit leur débit d'entrée et en supposant la détente dans la vanne PV10701 adiabatique, proposer et justifier par le calcul un dimensionnement de la puissance de l'échangeur du RCU.

A.3 Conception de l'alternateur

Hypothèses :

Pour des raisons d'éco-conception, d'encombrement et de coût, le choix se porte sur un alternateur triphasé synchrone à 4 pôles lisses en sortie du GTA. Les enroulements statoriques couplés en étoile sont connectés à un réseau électrique supposé de puissance infinie de fréquence 50 Hz. Les tensions et courants produits sont équilibrés et parfaitement sinusoïdaux. Le système de régulation d'excitation par bobinages auxiliaires (AREP) injecte un courant supposé continu dans les enroulements rotoriques. Le circuit magnétique de la machine n'est jamais saturé et son entrefer est supposé constant. Les champs magnétiques et les forces magnétomotrices d'induction sont à répartition spatiale sinusoïdale.

À son régime nominal sous 22 bar absolu la turbine tourne à $6\,726\text{ tr}\cdot\text{min}^{-1}$. La puissance mécanique à sa sortie est fonction de son débit, l'analyse porte sur les trois points de fonctionnement suivants :

Point	Régime de fonctionnement de l'UVE	P_{turbine}
A	Période d'été : PV10701 [0 %], PV10702 [2 %]	$P_{t\text{ max}} = 9,6\text{ MW}$
B	Période de chauffe : PV10701 [54 %], PV10702 [6 %]	$P_t = 3,6\text{ MW}$
C	Ilotage/autoconsommation : l'usine est découplée du réseau électrique. PV10701 [0 %], PV10702 [80 %]	$P_{t\text{ min}} = 1,2\text{ MW}$

Question 9 : Justifier la nécessité d'intercaler un réducteur de vitesse dans le GTA en calculant la vitesse de synchronisme de l'alternateur. Calculer le nombre de dents de la roue menée Z_s pour un engrenage menant à $Z_e = 31$ dents. Le rendement en charge du réducteur est supposé constant $\eta_r = 98,8\%$, calculer le couple et la puissance mécanique maximaux absorbés en entrée de l'alternateur C_{max} et $P_{a\text{ max}}$.

Pour la suite, on se place en régime permanent et équilibré. Dans ces conditions le modèle de Behn-Eschenburg, dans le domaine complexe, proposé figure 3, permet de dimensionner les grandeurs électriques.

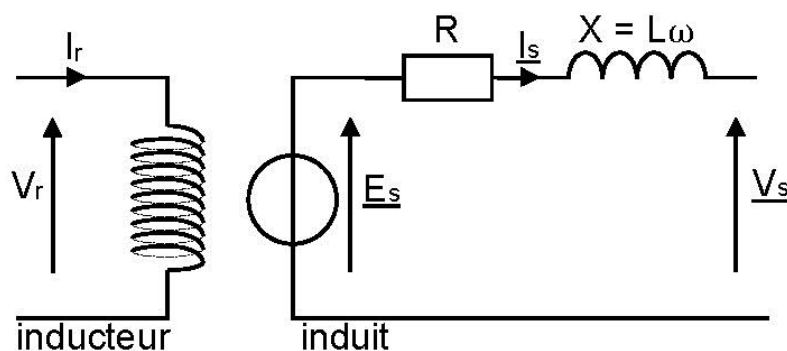


Figure 3 Modèle simplifié d'une phase de l'alternateur

Question 10 : Établir la relation liant \underline{E}_s , R , X , \underline{I}_s et \underline{V}_s . Représenter sur votre copie, sans échelle, le diagramme vectoriel de Fresnel de ce circuit en prenant \underline{V}_s comme référence et en faisant apparaître φ_{IV} un angle de déphasage positif pour un réseau inductif et δ_{VE} l'angle interne de la machine synchrone positif pour un fonctionnement en génératrice, pour simplifier les représentations ces angles seront notés φ et δ .

Hypothèses :

La f.é.m. ne dépend que de la vitesse du rotor et de l'intensité du flux magnétique $E_s = k \cdot I_r$. L'influence de R sur la chute de tension dans l'induit est négligeable devant celle de X .

Question 11 : En convention générateur, donner l'expression des puissances apparente S , active P_s et réactive Q_s fournies par la machine sur le réseau en fonction de V_s , I_s et φ . Sur le DR3, identifier les projections du vecteur $X \cdot \underline{I_s}$ sur les axes réel et imaginaire du diagramme. Donner l'expression des longueurs a et b de ces projections ainsi que le coefficient les liant à P_s et Q_s . La tension du réseau et la réactance étant constantes, conclure sur les projections selon les deux axes.

L'alternateur est dimensionné pour que l'intersection entre les limitations rotoriques et statoriques soit le point A de puissance mécanique maximale $P_{t \max}$, et qu'en ce point il puisse fournir des courants sous un déphasage φ_A tel que $\cos(\varphi_A) = 0,8$ en présentant un rendement nominal $\eta_{alt} = 95 \%$.

Question 12 : Tracer sur le DR3 les limites de fonctionnement de la machine imposées par les échauffements dus aux pertes joules rotoriques et statoriques $I_{r \max}$ et $I_{s \max}$, et par sa stabilité dynamique $\delta < \pi/2$.

Question 13 : Pour un régime permanent à puissance absorbée constante $\leq P_{a \max}$, préciser quelles sont les grandeurs réglante et réglée par le système de régulation du courant d'excitation I_r . Représenter sur le DR3 la trajectoire reliant les 3 points de fonctionnement (été A, chauffe B et ilotage C) en supposant une succession de régimes permanents.

Pour des critères d'encombrement, de limite de rigidité diélectrique et de saturation du circuit magnétique on impose $U_s = \sqrt{3} \cdot V_s = 6000 \text{ V}$ et $E_{s \max} = k I_{r \max} = 13000 \text{ V}$.

Question 14 : En régime permanent au point A, déterminer l'expression de $I_{s \max}$ en fonction de $P_{t \max}$, V_s , η_r , η_{alt} , et φ_A . Effectuer l'application numérique.

Question 15 : Par application du théorème de Pythagore pour le point A, déterminer la relation liant $E_{s \max}$, V_s , φ_A , $I_{s \max}$ et X . Déterminer alors la réactance synchrone X de l'alternateur et son angle interne δ_A . Effectuer les applications numériques.

Le dimensionnement permet de choisir l'alternateur LSA58BM-VL95 présenté sur le DT3. L'hypothèse de machine à pôles lisses n'est pas validée, la saillance des pôles impose de représenter la réaction d'induit sur les deux axes du modèle de Park. En supposant que le circuit magnétique reste en limite de saturation, on peut tracer le diagramme de Blondel de la machine pour un modèle à deux réactances (figure 4).

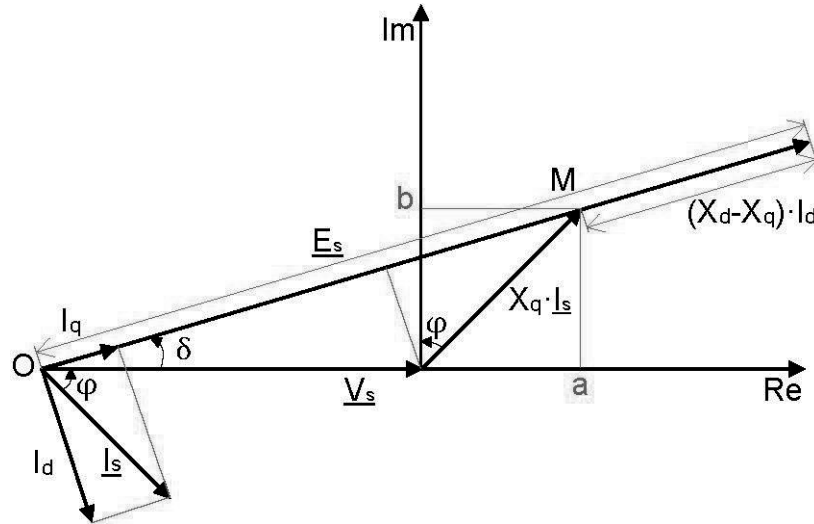


Figure 4 Diagramme de blondel d'une phase de l'alternateur

Question 16 : Par projection sur les axes direct et transverse, exprimer OM en fonction de V_s , E_s , X_d , X_q , et δ .

Question 17 : Sur le DT3 relever les valeurs de $X_{d\%}$ et $X_{q\%}$. Ces valeurs sont données en % par rapport à P_N , c'est-à-dire $X = X_{\%} \cdot V_N / I_N$. Effectuer l'application numérique pour X_d et X_q .

Pour le point A défini par $\cos(\varphi_A) = 0,8$ et $I_s \text{ max} = 1085 \text{ A}$.

Question 18 : Par projection de $X_q \cdot I_s$, exprimer l'angle interne de la machine δ_A en fonction de V_s , I_s , X_q et φ_A . Effectuer l'application numérique.

Question 19 : En utilisant l'expression de OM de la question 16, calculer la valeur de $E_{s \text{ max}}$ et comparer cette valeur à celle de la machine à pôles lisses. Conclure sur l'intérêt des rotors à pôles saillants dans la conception des alternateurs.

A.4 Dimensionnement du transformateur

La tension de sortie de l'alternateur $U_s = 6000 \text{ V}$, doit être adaptée au réseau de distribution HTA du territoire : réseau triphasé sinusoïdal équilibré supposé infini ($U_{res} = 20 \text{ kV}$, $f = 50 \text{ Hz}$). La puissance apparente normalisée du transformateur est directement supérieure à celle de l'alternateur, $S_N = 12,5 \text{ MVA}$. Le rendement en charge à 75°C , $\eta_{transfo} = 99,3 \%$.

Hypothèses :

Pour des raisons d'encombrement et de limite de rigidité diélectrique, un transformateur YNd11 à flux forcé sur 3 colonnes est choisi. Les solutions de filtrage anti-harmonique sont supposées parfaites. Les champs magnétiques et les forces magnétomotrices d'induction sont à répartition spatiale sinusoïdale de fréquence $f = 50 \text{ Hz}$. La démarche de conception est itérative et le problème de conception admet plusieurs solutions, cette conception se place en aval du prédimensionnement de la structure.

La structure interne du transformateur est donnée figure 5.

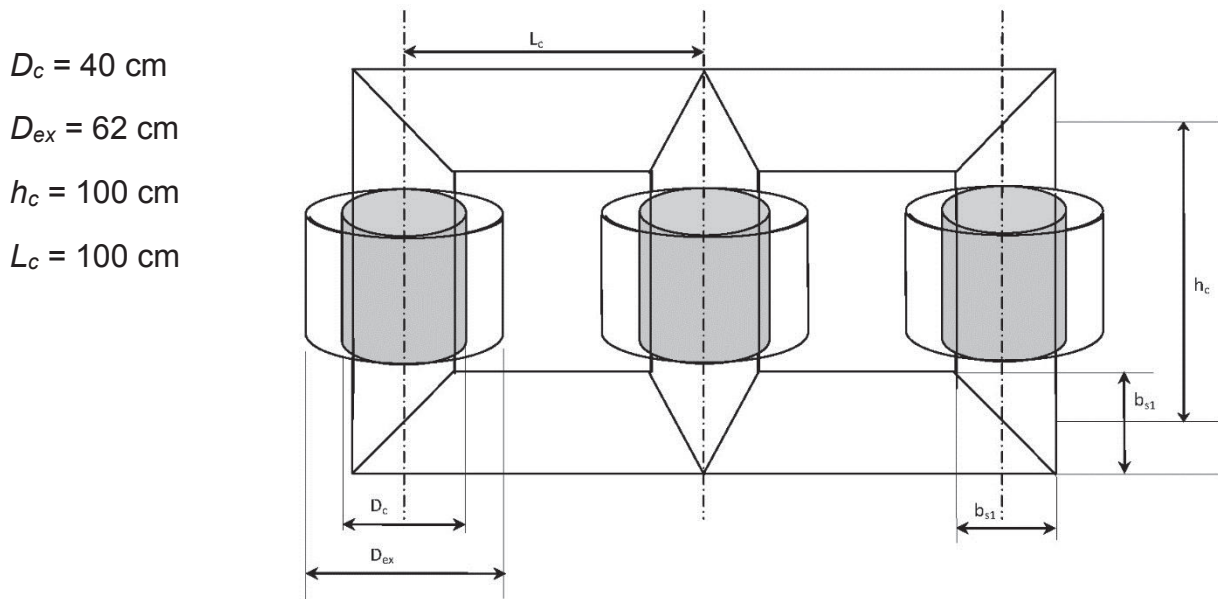


Figure 5 Structure interne du transformateur

Question 20 : Dessiner le couplage YNd11 sur le DR1. Indiquer les valeurs de U_1 , U_2 , V_a , V_A . Le rapport de transformation complexe du transformateur est $\underline{m} = \frac{U_{20}}{U_1} = 3,5 e^{-j\frac{11\pi}{6}}$. Donner l'expression complexe numérique de \underline{U}_{20} (tension composée à vide) en prenant \underline{U}_1 comme référence des déphasages.

Le modèle du transformateur monophasé équivalent par colonne est rappelé figure 6.

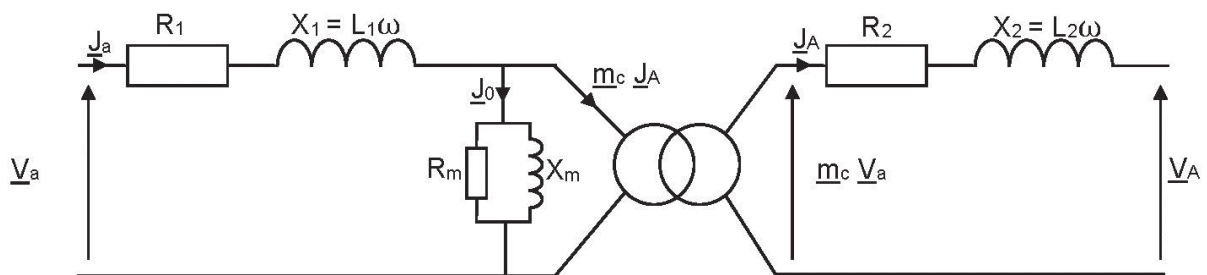


Figure 6 Modèle monophasé d'une colonne de transformateur triphasé

Dans l'hypothèse de Kapp, les pertes fer du transformateur sont négligées ($J_0 \ll m_c J_A$), le modèle devient alors celui donné figure 7.

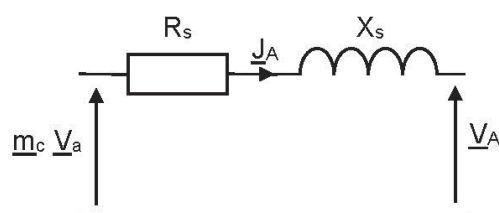


Figure 7 Modèle de Kapp d'une colonne

Question 21 : Au régime nominal, donner les valeurs de J_a , m_c et J_A . Exprimer R_s et X_s en fonction de R_1 , X_1 , R_2 , X_2 , et m_c .

Paramétrage du noyau à un seul gradin de section carré de côté b_{s1} (figure 8) :

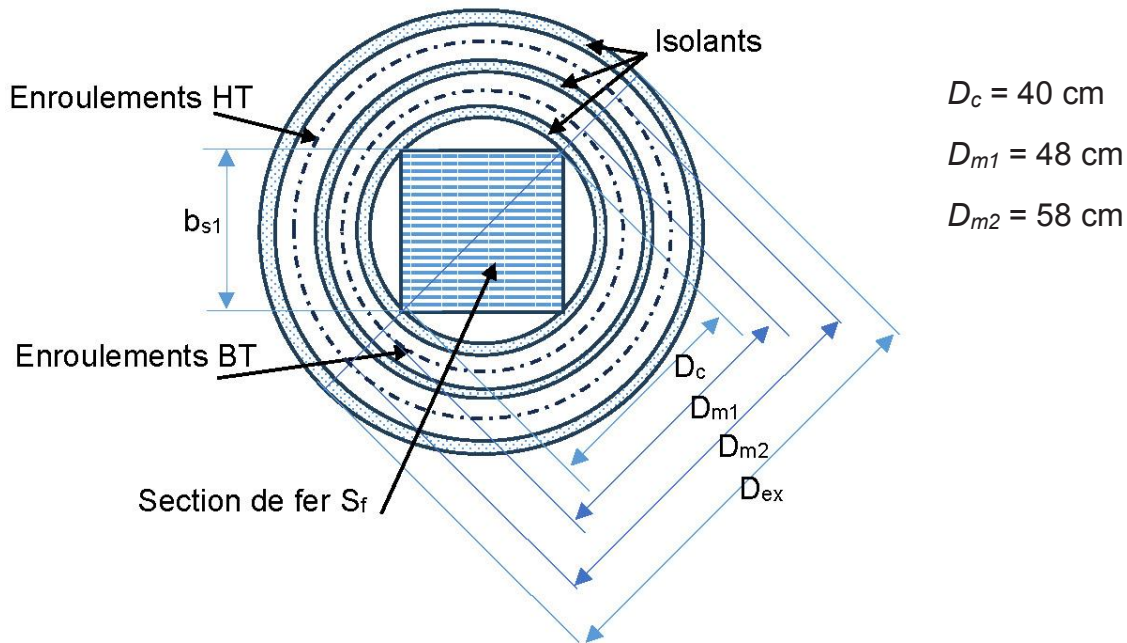


Figure 8 Coupe détaillée d'une colonne

Question 22 : Donner l'expression de S_f en fonction de D_c . Calculer le coefficient d'utilisation de la section du fer $K_u = \frac{4 S_f}{\pi D_c^2}$.

Pour limiter les pertes par hystérésis dans le noyau, l'induction magnétique maximale est limitée à $B_{max} = 1,85$ T.

Question 23 : Exprimer la force électromotrice efficace par spire dans les enroulements E_{sp} en fonction de f , B_{max} et S_f . Effectuer l'application numérique.

Question 24 : Calculer alors les nombres de spires N_1 au primaire (côté alternateur) et N_2 au secondaire (côté HTA) dans chacune des trois colonnes. Pour le calcul, le transformateur fonctionne à vide ($U_2 = U_{20}$) et les chutes de tension ohmiques sont négligées.

Pour limiter les pertes par effet joules la densité de courant moyenne dans les enroulements primaires et secondaires est identique $J_1 = J_2 = 3$ A·mm⁻².

On rappelle la résistivité du cuivre à 75°C, $\rho_{cu} = 2,12 \cdot 10^{-8}$ Ω·m.

Question 25 : Calculer les sections des conducteurs primaires et secondaires S_1 et S_2 en mm². Donner l'expression de la longueur moyenne d'une spire au primaire et au secondaire en fonction de D_{m1} et D_{m2} , en déduire les expressions littérales de R_1 et R_2 . Calculer les pertes cuivre dans le transformateur à 75°C.

Question 26 : En utilisant les rendements fournis au long de cette partie, pour les trois points (A, B, C) de fonctionnement de l'usine, calculer la puissance électrique disponible sur le réseau HTA du territoire. En négligeant les durées des périodes d'ilotage et en considérant une période de chauffe moyenne d'octobre à avril calculer l'énergie électrique annuelle fournie par l'UVE sur le réseau.

PARTIE B : Conception du réseau express régional

L'objectif de cette partie consiste à dimensionner certains composants de la chaîne de traction d'une rame automotrice du nouveau RER afin de l'adapter aux systèmes de production locaux et décentralisés du territoire.



B.1 Détermination de la motorisation nécessaire

Question 27 : À l'aide des DT4 et DT5, en appliquant le principe fondamental de la dynamique à la caisse symbolisant le train, donner la relation scalaire liant M_v , a , F_t et R_{av} . Justifier les termes des masses tournantes et masse statique dans l'expression de la masse virtuelle.

Hypothèses :

Une rame se compose de six caisses supportées par deux bogies à double essieux.

N_e : nombre total d'essieux de la rame.

$g_0 = 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$: accélération de la pesanteur.

λ_t : coefficient d'adhérence en traction 0,25. (rapport de la force tangentielle maximale avant glissement à la force normale appliquée au contact entre deux solides : loi de Coulomb).

F_{emax} : l'effort maximum transmissible par essieu (somme des deux efforts transmissibles par chaque jante au niveau du point contact avec le rail).

Le rendement de la transmission jante rail est supposé égal à 1.

Question 28 : Dans le cas d'une équirépartition des masses, exprimer F_{emax} en fonction du coefficient d'adhérence en traction λ_t , de M_s , N_e et g_0 . Effectuer l'application numérique.

Entre 0 et $40 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, la rame fonctionne à effort maximal constant.

Pour déterminer la puissance utile de la rame, P_u , on considère qu'elle est atteinte à la vitesse de $V = 40 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Cette valeur de P_u restera constante dans la gamme de vitesse comprise entre $40 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ et $160 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$.

Masse équivalente tournante d'un essieu non motorisé = 500 kg

Masse équivalente tournante d'un essieu motorisé = 800 kg

N_m : nombre d'essieux motorisés

Question 29 : Exprimer M_v en fonction de M_s , N_e et N_m . En remplaçant dans la relation établie à la question 27, montrer que le nombre minimal d'essieux motorisés s'exprime par la relation suivante pour une accélération moyenne a_{moy} et une résistance à l'avancement moyenne $R_{av_{moy}}$:

$$N_m \geq \frac{R_{av_{moy}} + a_{moy} \cdot (M_s + N_e \cdot 500)}{F_{e_{max}} - a_{moy} \cdot 300}$$

En linéarisant l'expression de la résistance à l'avancement entre 0 et 40 km·h⁻¹, on donne :

$$R_{av_{moy}} = \frac{R_{av_0} + R_{av_{40}}}{2}, \quad a_{moy} = 0,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \text{ et } F_{e_{max}} = 27,6 \text{ kN.}$$

Pour des critères de symétrie, la première valeur entière de N_m multiple de 4 est retenue.

Question 30 : Déterminer numériquement N_m et la puissance utile de la rame P_u à 40 km·h⁻¹ (pour une accélération de 0,6 m·s⁻² et une résistance à l'avancement R_{av} pour 40 km·h⁻¹).

Le rendement du réducteur est $\eta_r = 98 \%$.

Question 31 : En déduire l'expression et la valeur de la puissance utile totale, P_{um} , fournie par l'ensemble des axes de sortie des moteurs à 40 km/h. En déduire la puissance fournie par moteur, P_{mot} .

D'après la liste ci-dessous, les moteurs 5 et 7 pourraient convenir. Compte-tenu de considérations mécaniques non développées ici, le moteur 7 sera retenu.

Numéro moteur		1	2	3	4	5	6	7	8
Vs max	V	810	660	675	1230	1107	1620	810	675
Us max	V	1403	1143	1169	2130	1917	2806	1405	1169
fs au RC	Hz	66.28	50.2	73	106	66.3	111	151.5	
P max traction	kW	450	402	220	260	250	708	250	275
paire poles		2	2	2	3	2	3	3	2
Couple RC	Nm	2186	2602	982	1182		3073	797	1050
rpm au RC	rpm	1966	1475	2140	2100	1963	2200	3000	2500
Couple démarrage	Nm	3740	4100	1640	3330	2656	5500	2160	3500
rpm max	rpm	3932	3932	4636	4513	4078	3669	6000	4800
flux nominal	Wb	1.88	2.04	1.74	3.18	2.64	2.93	0.623	1.82
Rs	mΩ	27.1	35.8	87.4	283	207	105	36.5	77
Rr	mΩ	28.5	36.6	90.2	144	152	92	40.7	77
L1	mH	0.847	1.08	1.95	2.99	2.85	1.79	0.84	1.1
L2	mH	0.565	0.72	1.3	1.99	1.9	1.19	0.56	0.74
Lm	mH	23	25	26.5	50	65	28	6	19.5

Figure 9 Liste de moteurs de traction

Le terme (RC) dans la liste ci-dessus est assimilé au régime nominal.

Le réseau RER est constitué de deux axes de circulation Nord-Sud et Est-Ouest constitués chacun de deux lignes (une par sens de circulation) de 50 km. Le temps de parcours d'une ligne est de 44 min. Le temps d'attente entre deux trains est de 22 min pour toutes les gares quel que soit le sens. La rame absorbe une puissance crête de 2,1 MW. Les pertes de distribution sur le réseau électrique HTA sont estimées à 6 %.

Question 32 : Calculer la puissance maximale totale nécessaire pour l'ensemble du réseau RER. Comparer cette valeur à la puissance maximale que peut fournir l'UVE de 9 MW et proposer des solutions d'adaptation.

B.2 Validation de l'architecture réelle de la chaîne de traction

Le modèle simplifié, ramené au stator, d'une phase en étoile du moteur asynchrone sans perte fer stator est donné figure 10.

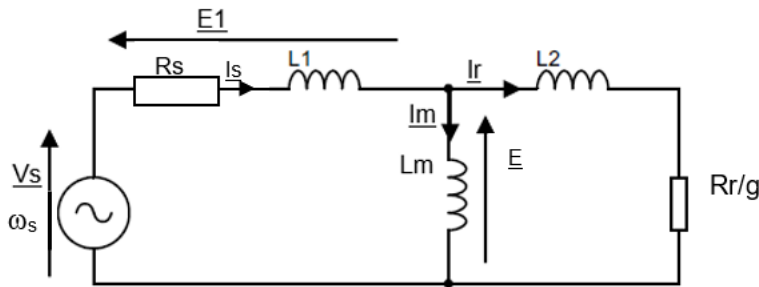


Figure 10 Modèle d'une phase de la machine asynchrone

R_s, L_1 : résistance et inductance de fuite au stator	L_m : inductance magnétisante
g : glissement du rotor par rapport au champ tournant	$g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s}$ avec Ω_s : vitesse angulaire de synchronisme
Ω : vitesse angulaire du rotor	R_r/g : Résistance fictive du rotor
L_2 : inductance de fuite du rotor	V_s : tension phase-neutre d'alimentation d'une phase du stator
I_s : courant statorique	I_m : courant magnétisant

Les valeurs soulignées sur la Figure 10 correspondent à des grandeurs complexes.

Les valeurs numériques des éléments du modèle sont indiquées dans la Figure 9 pour le moteur 7.

C_{em} : le couple électromagnétique, p le nombre de paires de pôles par phase.

On rappelle que la puissance transmise au rotor $P_{tr} = C_{em} \cdot \omega_s / p$ est égale à 3 fois la puissance dissipée dans la résistance R_r/g .

La pulsation des tensions et des courants statoriques est ω_s , imposée par la fréquence f_s de la tension V_s .

Le flux magnétisant est supposé constant $\Phi_m = \frac{E}{\omega_s}$ pour la zone de caractéristique couple/vitesse étudiée.

Question 33 : Démontrer que $C_{em} = \frac{3p}{L_2} \cdot \Phi_m^2 \frac{1}{\frac{g \cdot L_2 \cdot \omega_s}{R_r} + \frac{R_r}{g \cdot L_2 \cdot \omega_s}}$. Déterminer

numériquement C_{em} et vérifier sa cohérence avec la valeur proposée pour le moteur retenu dans les conditions du régime RC de la Figure 9 pour le moteur 7.

Le réducteur a pour rapport de transmission $r_r = \frac{1}{5,67}$.

Le rayon de la jante est $R_j = 435 \text{ mm}$.

Le cahier des charges impose que la vitesse maximale, V_{max} , accessible soit de $160 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ avec une accélération résiduelle, a_{res} , de $0,05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.

Question 34 : Compte-tenu des caractéristiques du moteur 7, exprimer et calculer V_{max} , a_{res} . Vérifier que la valeur F_{emax} est accessible au démarrage. Conclure sur le choix de la motorisation vis-à-vis des performances attendues.

L'architecture de la chaîne (figure 11) correspond à un équipement de traction composé de 4 moteurs asynchrones triphasés (M1 à M4). Il est situé à une extrémité de la rame. La chaîne complète de traction est constituée de deux équipements identiques. Les 4 moteurs sont connectés parallèlement sur un onduleur unique. Le redresseur d'entrée PMCF (pont monophasé à commutation forcée) délivre la tension E supposée constante sur le bus continu, $E = 2000 \text{ V}$. La seule tension caténaire représentée correspond à la zone de faible densité de population du territoire $25 \text{ kV}/50 \text{ Hz}$.

Pour l'IGBT retenu et son allumeur, les caractéristiques sont les suivantes :

$\theta_{jmax} = 120 \text{ }^\circ\text{C}$: Température de jonction (diode et transistor) maximale ;
Tension commutable 3300 V , fréquence limite de commutation $f_{max} = 1000 \text{ Hz}$;
Courant crête commutable $I_{scmax} = 1200 \text{ A}$.

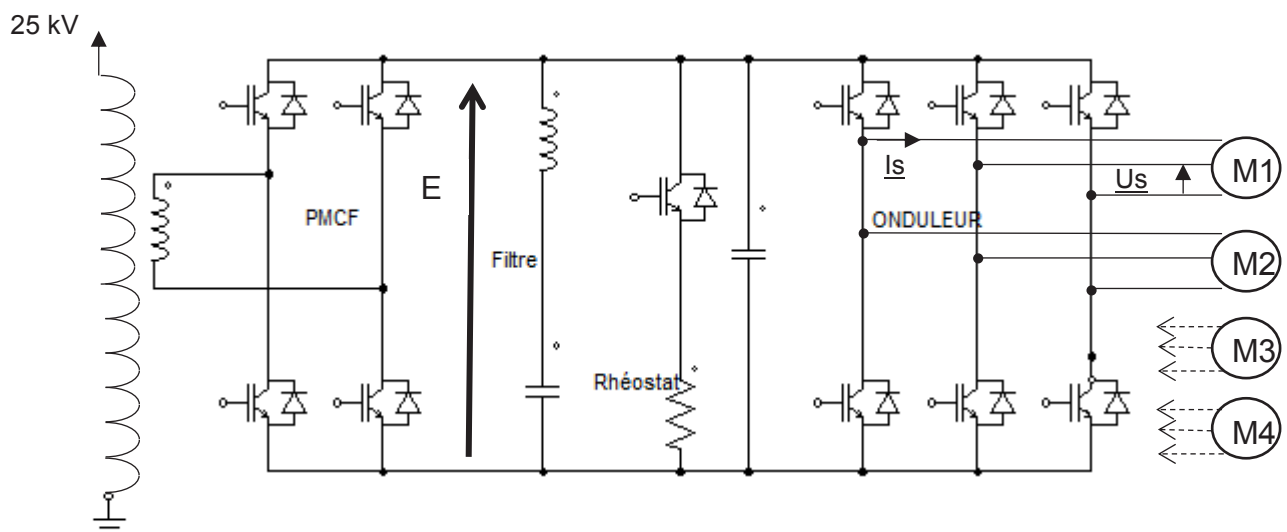


Figure 11 Schéma de puissance d'un équipement de traction simplifié

On appelle U_s la tension efficace entre phase, I_s le courant de ligne délivré par l'onduleur pour chacun des moteurs fonctionnant sous la même puissance utile de 250 kW . La stratégie de limitation en courant est supposée parfaite et réglée au point de fonctionnement nominal des moteurs (U_{smax} , I_{smax}).

Données :

$U_{smax} = 1405 \text{ V}$; $\cos \varphi = 0,88$; rendement moteur : $\eta_m = 95 \%$

Question 35 : Calculer le courant de ligne efficace I_{smax} . Justifier le choix du transistor retenu.

Hypothèses :

La solution retenue pour le refroidissement est une plaque à eau supportant l'ensemble des 6 modules IGBT (Transistor + diode) de l'onduleur. Le schéma thermique nodal d'un module IGBT et d'une plaque est donné figure 12. Les pertes dans les transistors et les diodes sont supposées homogènes pour l'ensemble des 6 modules. Le régime permanent thermique est obtenu pour un courant de ligne $I_s = I_{smax}$ et une température d'eau de refroidissement $\theta_{eau} = 65\text{ }^\circ\text{C}$.

Un extrait de la documentation technique pour le transistor IGBT choisi précisant les pertes par conduction dans la diode et le transistor pour le régime thermique étudié est donné figure 12.

Infineon FZ1200R33KF2		
Tension max	V_{CES}	3,3 kV
Courant nominal crête	I_C	1 200 A
Fréquence max	f_{max}	1 kHz
Température max	θ_{jmax}	120°C
IGBT Conduction		
Perte par conduction transistor	P_{trans}	626 W
Diode Conduction		
Perte par conduction diode	P_{diode}	45 W

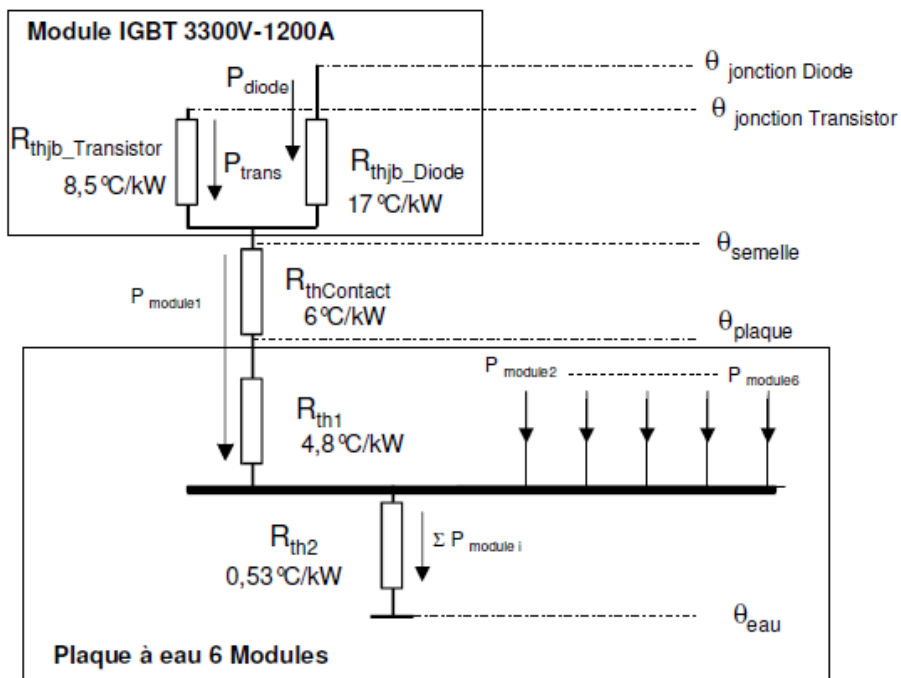


Figure 12 Schéma thermique nodal d'un module

Question 36 : Exprimer et calculer la température de la semelle θ_{sem} .

Question 37 : Calculer la température de jonction d'une diode et d'un transistor implanté sur la plaque de refroidissement. Conclure quant au dimensionnement de la chaîne de traction et de son dispositif de refroidissement.

B3. Stratégie de contrôle de l'onduleur de traction

Principes de fonctionnement :

La structure de l'onduleur de traction associé à la machine de traction est donnée figure 13.

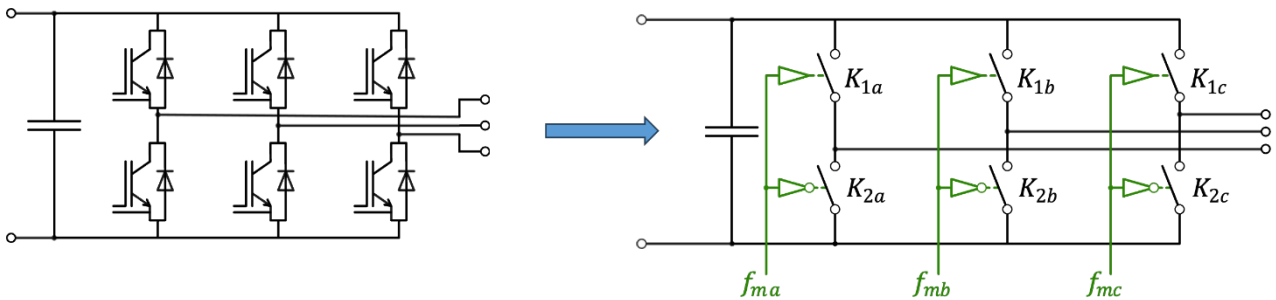


Figure 13 Structure interne de l'onduleur

Pour obtenir un modèle simplifié, les interrupteurs électroniques sont supposés parfaits. Chaque interrupteur est repéré par un symbole ($K_{1a}, K_{2a}, K_{1b}, K_{2b}, K_{1c}, K_{2c}$). Les commandes associées à chaque bras de l'onduleur sont définies par des fonctions de modulation respectivement notée f_{ma} , f_{mb} et f_{mc} .

Question 38 : Expliquer pourquoi il est nécessaire d'avoir une commande complémentaire pour chaque bras de l'onduleur.

Question 39 : Expliquer ce qu'il se passerait si une des diodes, en dérivation, sur un IGBT, défaille, se retrouvait en circuit ouvert.

Le principe du générateur des fonctions de modulation est décrit sur la figure 14.

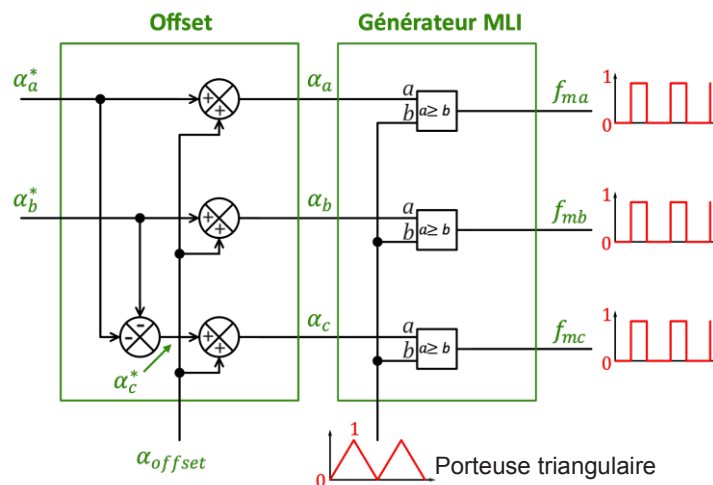


Figure 14 Principe général du générateur des fonctions de modulations

Les évolutions des grandeurs $\alpha(t)$ (figure 15) sont synchronisées avec la porteuse triangulaire. Le signal est donc échantillonné et bloqué pendant une période de la porteuse. Sa valeur sur une période est notée $\alpha(k \times T_d)$; $k \in \mathbb{N}$.

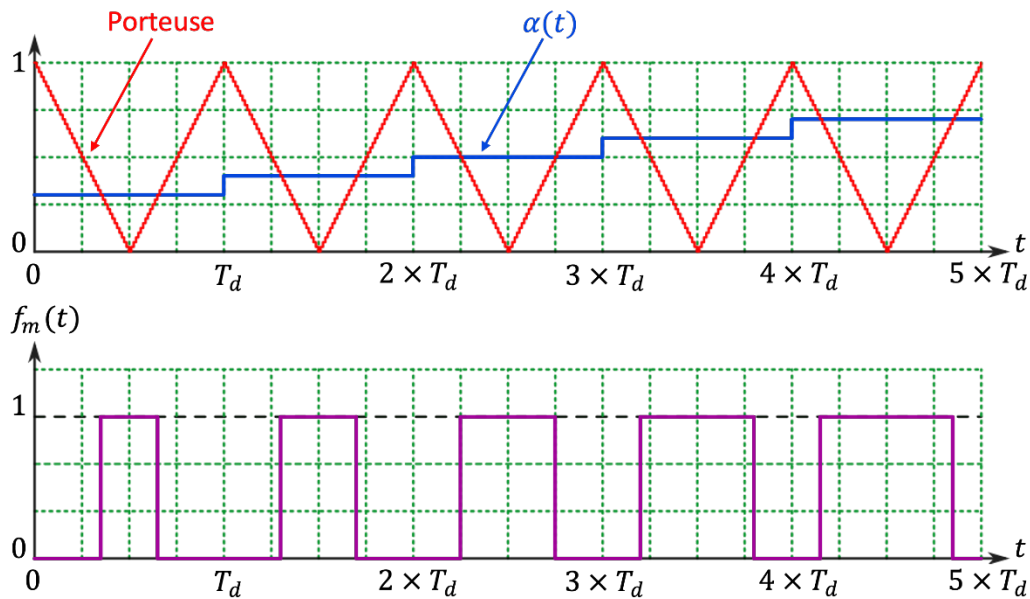


Figure 15 Formes des signaux du générateur des fonctions de modulations

Question 40 : Sur un intervalle de durée T_d , exprimer la durée de l'état haut T_h de $f_m(t)$ en fonction de $\alpha(k \times T_d)$ et T_d . En déduire le rapport cyclique (noté $\alpha_{f_m}(k \times T_d)$) de la fonction $f_m(t)$ sur la période T_d en fonction de $\alpha(k \times T_d)$.

Question 41 : Donner la plage de linéarité du générateur MLI. Au-delà de cette plage de linéarité, indiquer les valeurs des rapports cycliques $\alpha_{f_m}(k \times T_d)$.

Question 42 : Déterminer la valeur moyenne (notée $\overline{f_m}(k \times T_d)$) de la fonction de modulation $f_m(t)$ sur la période T_d en fonction du signal d'entrée $\alpha(k \times T_d)$.

La fonction de modulation $f_m(t)$ peut se décomposer comme une valeur moyenne sur un intervalle de temps T_d et une variation autour de cette valeur moyenne $\hat{f}_m(t)$.

$$\text{Soit : } f_m(t) = \overline{f_m}(k \times T_d) + \hat{f}_m(t).$$

La chaîne de conversion complète est présentée figure 16.

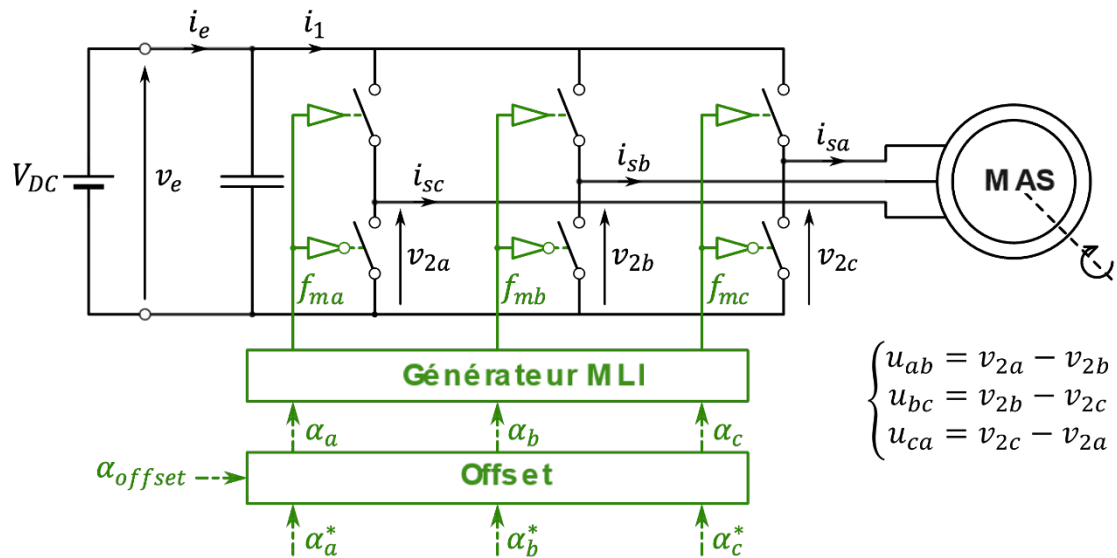


Figure 16 Représentation de la chaîne de conversion complète

Question 43 : En utilisant les notations de la figure 16 et sur le fonctionnement des bras de l'onduleur, donner l'expression liant les tensions $v_{2x}(t)$ $\{x \in (a; b; c)\}$ à $f_{mx}(t)$ et, dans un second temps, à $\alpha_x(k \times T_d)$ et $\hat{f}_{mx}(t)$.

Question 44 : Donner les expressions des trois tensions composées de la figure 16 u_{xy} $\{x \in (a; b; c); y \in (a; b; c); x \neq y\}$ en fonction des fonctions de modulation $f_{mx}(t)$.

Dans la partie qui suit, les commandes imposées au générateur MLI sont définies de la façon suivante :

$$\begin{aligned}\alpha_a^*(k \times T_d) &= m \times \sin(\omega \cdot k \cdot T_d - \varphi) \\ \alpha_b^*(k \times T_d) &= m \times \sin\left(\omega \cdot k \cdot T_d - \frac{2\pi}{3} - \varphi\right) \\ \alpha_c^*(k \times T_d) &= m \times \sin\left(\omega \cdot k \cdot T_d - \frac{4\pi}{3} - \varphi\right) \\ \alpha_{offset} &= 0,5\end{aligned}$$

Question 45 : Pour ces formes de commande, donner la plage de variation de l'indice de modulation m permettant de rester dans la plage de linéarité du générateur MLI.

Les formes d'onde des tensions générées par l'onduleur sont données figure 17 pour un indice de modulation $m = 0,4$. Les temps t' apparaissant sur ces figures sont normalisés à T (la période du signal sinusoïdal, soit : $t' = t/T$). Sur la figure 16, la tension V_{DC} est fixée de manière arbitraire à 350 V et la période T_d de la porteuse du générateur MLI est 20 fois inférieure à la période du signal sinusoïdal.

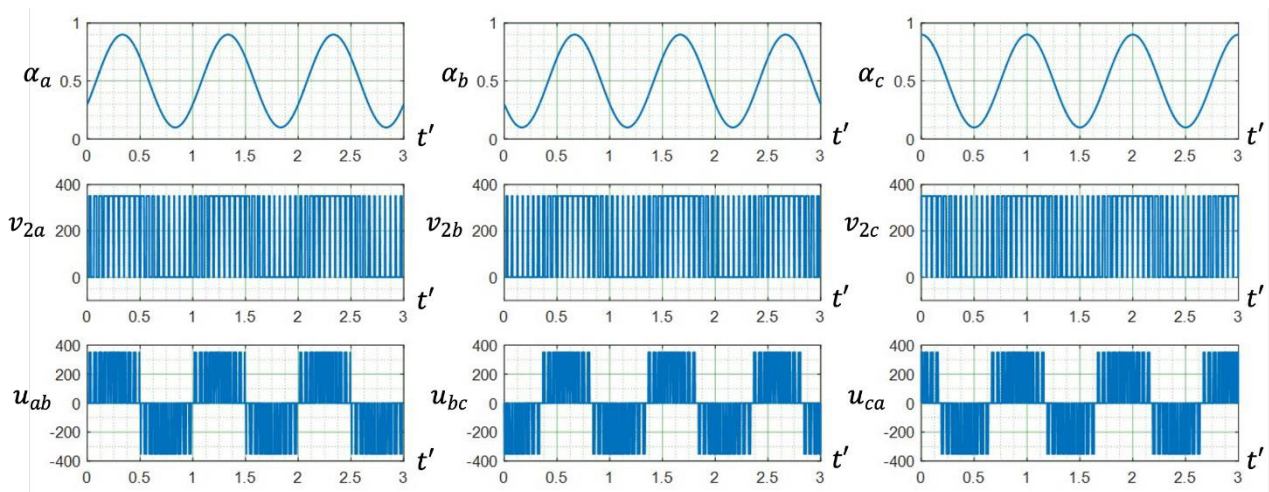


Figure 17 Formes d'onde des tensions générées par l'onduleur

Question 46 : Justifier les amplitudes et la forme des tensions v_{2x} et u_{xy} .

Question 47 : Donner la fréquence f_d de fonctionnement des interrupteurs des bras de l'onduleur en prenant en référence la fréquence du signal sinusoïdal f_{sinus} .

Cette fréquence est appelée fréquence de découpage.

Le spectre des tensions composées est donné figure 18. L'axe des fréquences est normalisé par rapport à la fréquence du signal sinusoïdal. Ce spectre possède une signature particulière liée à la technique de modulation du variateur.

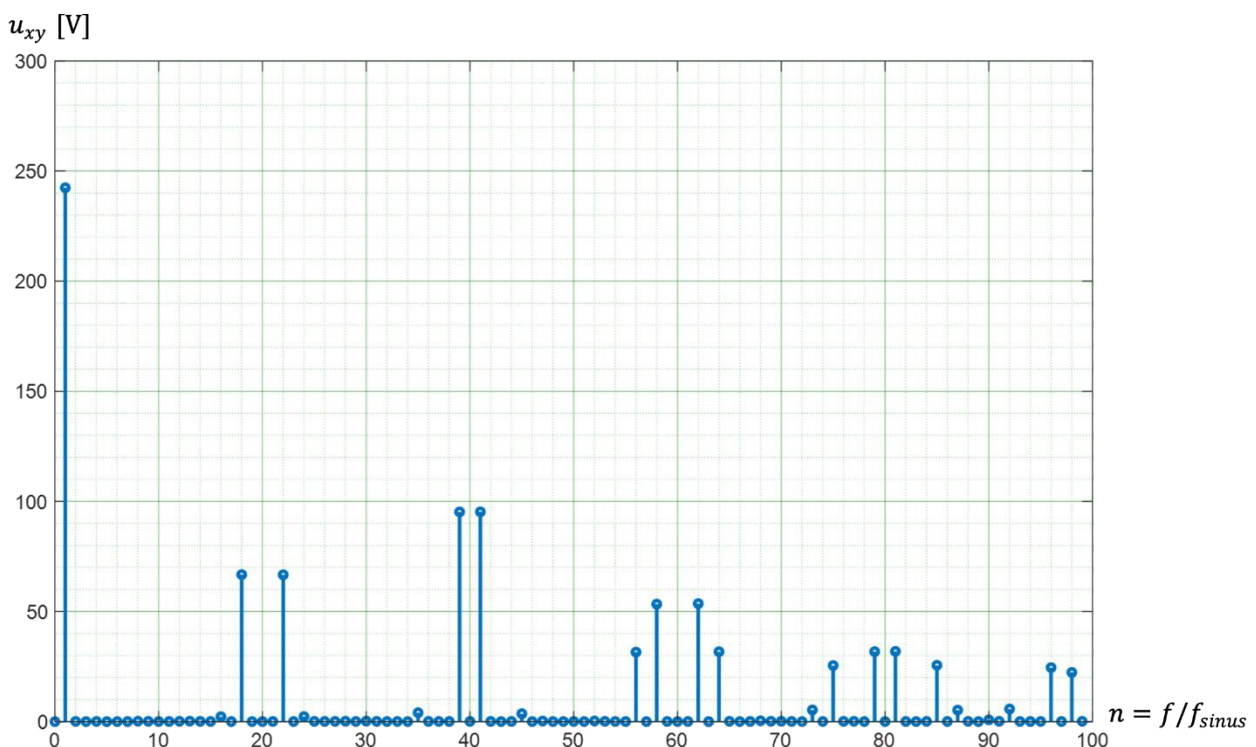


Figure 18 Spectre des tensions générées par l'onduleur

Pour fonctionner correctement, les enroulements de la machine asynchrone doivent être parcourus par des courants ne présentant pas d'ondulations excessives à la fréquence de

découpage des tensions de l'onduleur. Pour cela ces composantes fréquentielles doivent être atténuées le plus possible.

Question 48 : Discuter de l'intérêt d'utiliser une technique de modulation de largeur d'impulsions à haute fréquence vis-à-vis de ce critère de qualité des courants.

Question 49 : Donner le type de filtre qui permet de réaliser la fonction d'atténuation des ondulations de courant. Discuter de la nature de la charge que constitue la machine asynchrone vis-à-vis de ce critère.

Hypothèses :

Les conditions précédentes sont vérifiées et les composantes hautes fréquences liées au découpage sont parfaitement filtrées par la charge. Le courant dans la charge n'est alors défini que par les composantes basses fréquences des fonctions de modulation :

$f_{mx}(t) \approx \overline{f_{mx}}(k \times T_d)$. Le « modèle moyen » du convertisseur permet de considérer ces fonctions à évolution quasi-continue dans la suite des développements, elles seront donc notées $\overline{f_{mx}}(t)$. Dans cette représentation du fonctionnement du convertisseur, les courants et tensions de la structure ne comportent plus la partie haute fréquence liée au découpage des formes d'ondes. On utilise dans ce cas pour différentier le modèle moyen du modèle complet la notation \bar{x} pour une grandeur $x(t) = \bar{x}(t) + \tilde{x}(t)$.

Question 50 : Écrire dans ces conditions les relations liant les composantes basse fréquence des tensions $v_{2x}(t)$ (notées $\overline{v_{2x}}(t)$, $x \in (a; b; c)$) aux signaux de commande $\alpha_x(t)$ et à la tension d'entrée V_{DC} . En déduire celles liant les tensions $\overline{v_{2x}}(t)$ aux signaux $\alpha_x^*(t)$ et $\alpha_{offset}(t)$.

Question 51 : À partir des relations précédentes, compléter le schéma équivalent du modèle moyen de l'onduleur sur le document réponse DR1.

Question 52 : Démontrer que $\overline{u_{ab}}(t) = K \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \varphi - \frac{\pi}{3}\right)$. Exprimer K en fonction de m et V_{DC} . Calculer K pour $m = 0,4$ et $V_{DC} = 350 V$. Vérifier cette valeur avec la première raie du spectre de figure 18.

Question 53 : Au regard de la plage de variation de m , déterminer l'amplitude maximale atteignable pour les tensions composées dans cette configuration de commande.

En fait, la modulation « sinus-triangle » décrite précédemment n'est quasiment jamais utilisée dans un variateur de vitesse. Les commandes usuelles utilisent des techniques d'injection d'une composante d'offset sur les entrées de commande du convertisseur (ici notée α_{offset}).

Une des stratégies très classique consiste à injecter la composante $\alpha_{offset}(t)$ suivante :

$$\alpha_{offset}(t) = 0.5 \times (1 - \max(\alpha_a^*, \alpha_b^*, \alpha_c^*) - \min(\alpha_a^*, \alpha_b^*, \alpha_c^*))$$

Pour une telle stratégie de commande, les formes d'onde obtenues pour $m=0,4$ sont :

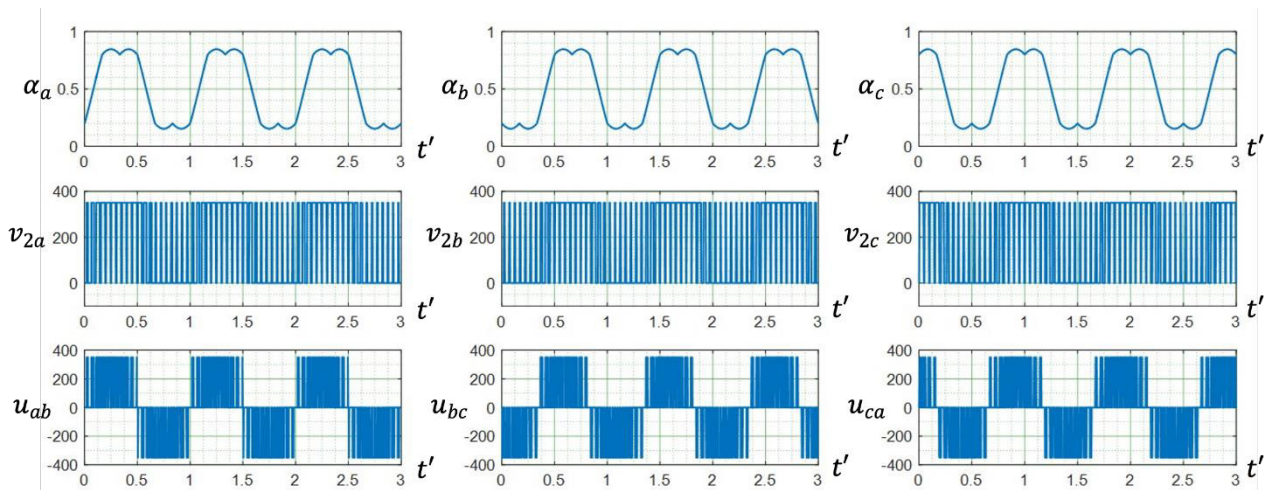


Figure 19 Formes d'onde des tensions générées par l'onduleur

Les grandeurs α_x $x \in (a ; b ; c)$ varient désormais de $0,5 - \frac{\sqrt{3}}{2} \times m$ à $0,5 + \frac{\sqrt{3}}{2} \times m$.

Question 54 : Calculer la valeur maximale de l'indice de modulation m pour cette stratégie de commande.

Question 55 : Pour la valeur extrême de m déterminée à la question précédente, déterminer l'amplitude maximale atteignable. Comparer cette amplitude maximale à celle découlant de la modulation sinus-triangle pour laquelle $\alpha_{offset}(t) = 0,5$. Calculer le gain obtenu en pourcentage. Conclure sur la stratégie de commande de l'onduleur.

Synthèse

L'objectif du RER à l'orée 2035 est de transporter 16 % de la population du territoire quotidiennement. Pour l'atteindre, huit trains circulent en permanence sur le réseau de 6h à minuit en absorbant une puissance moyenne par train $P_{moy} = 1$ MW.

Outre ses objectifs environnementaux en termes de traitement des déchets, l'UVE doit fournir 40 % de l'énergie thermique du RCU métropolitain.

Question 56 : Calculer l'énergie active moyenne annuelle absorbée par le RER. En comparant ce résultat à la ressource annuelle disponible calculée à la question 26, valider le dimensionnement des composants de l'UVE. Proposer une solution technique pour améliorer la « capacité d'approvisionnement en électricité en pourcentage de la demande d'électricité de pointe » du territoire notamment sur la plage minuit, 6h.

DOCUMENTS TECHNIQUES

DT1 Rapport de l'ADEME

DT2 Synoptique du circuit hydraulique de l'UVE

DT3 Extrait de la notice de l'alternateur synchrone LSA58

DT4 Conception d'une rame automotrice

DT5 Modélisation de la résistance à l'avancement

Les flux de déchets en un coup d'oeil



DÉCHETS PRODUITS EN 2022

ENTREPRISES

(hors construction et hors assimilés)

95 millions de tonnes

1400 kg/hab.
- 13 % en dix ans

CONSTRUCTION

350 millions de tonnes

5 200 kg/hab.
- 9 % en dix ans

MÉNAGES

(déchets municipaux)

54 millions de tonnes

800 kg/hab.
- 3 % en dix ans

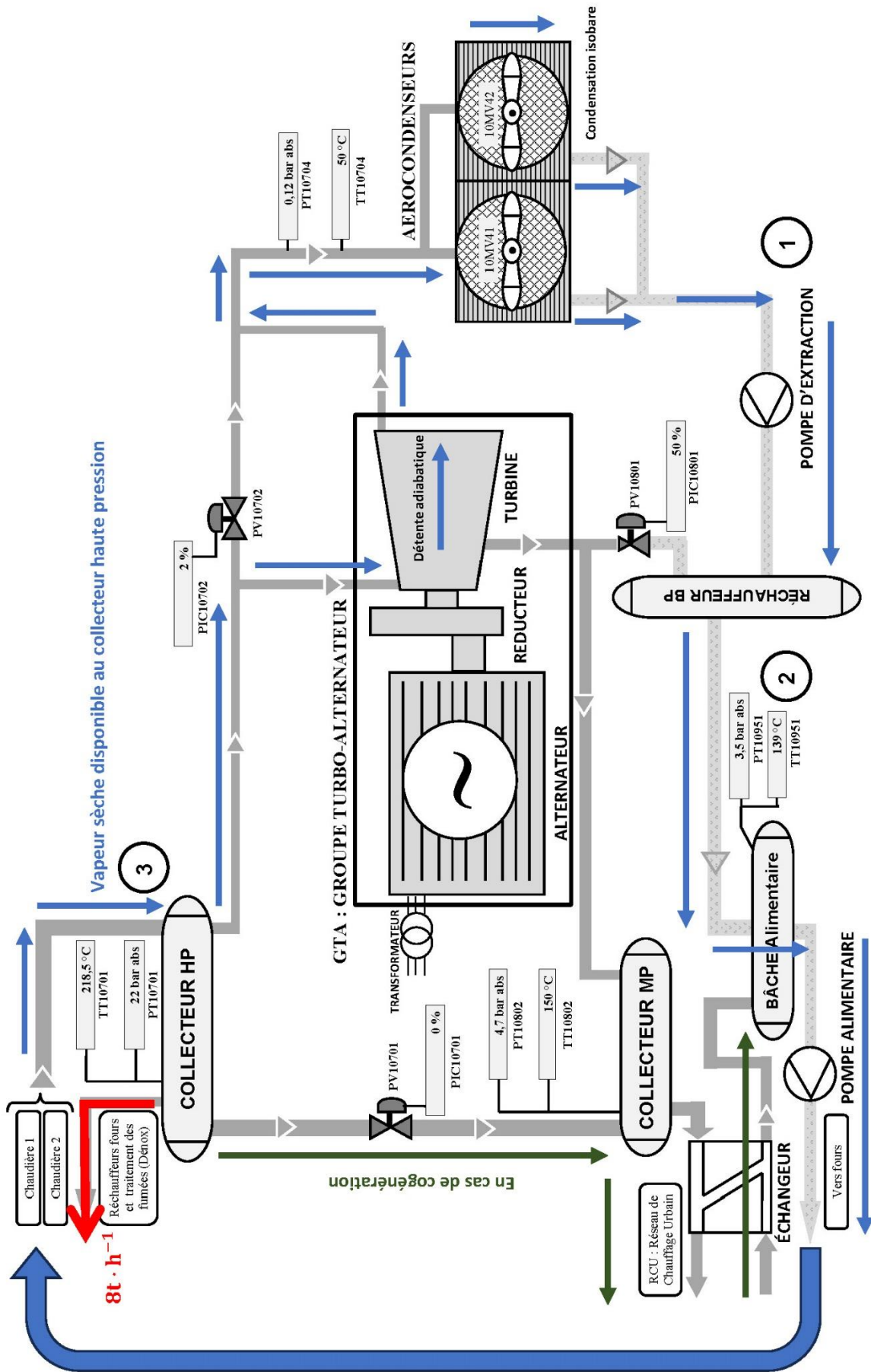


Environ 500 millions de tonnes soit 7,4 tonnes par habitant

Que deviennent-ils ?



Synoptique du circuit hydraulique de l'UVE



Extrait de la notice de l'alternateur synchrone LSA58



Moteurs Leroy Somer
 Dept. ACEO
 Boulevard Marie Stuart
 45005 ORLEANS CEDEX01 - FRANCE

Tel. : +33 (0)2 38 60 42 26
 Fax: +33 (0)2 38 60 42 85

Date:
 Client:
 Projet:
 Référence LS:

Installation:			
Site:	France	Entraînement:	Turbine vapeur
Application:	Production	Constructeur:	
		Type:	

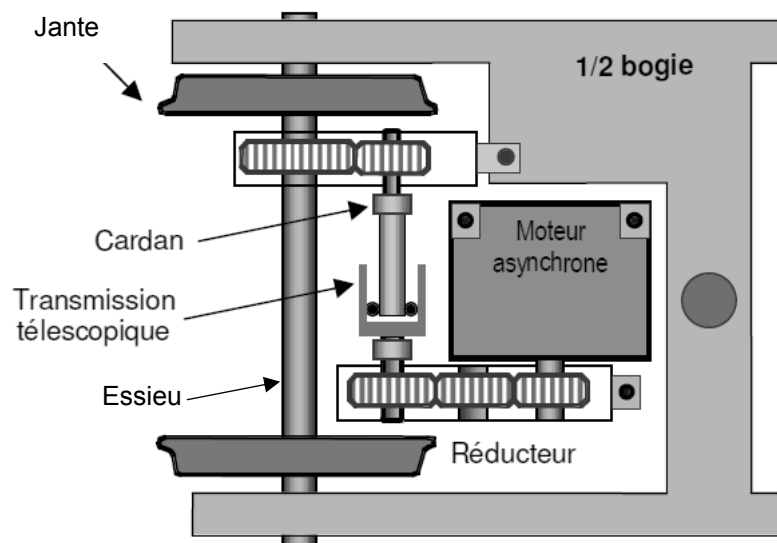
Caractéristiques générales:			
Type alternateur:	LSA 58 BM-VL95 / 4p		CACW
Puissance:	11 275 kVA	9 020 kWe	9 261 kWm
Tension:	6000 V	Tri étoile	± 5%
Vitesse:	1500 rpm	Survitesse: 1800	Durée (min.): 2
Fréquence:	50 Hz	Courant nominal: 1 085 A	
Cosinus phi:	0,8		
Pas de bobinage:	p5/6		
Isolation:	Stator: H	Rotor: H	Excitateur: H
Echauffement:	Stator: F	Rotor: F	Excitateur: F
Ambiante:	40 °C	Qualité: Eau douce	
Altitude:	280 m		
Protection:	IP54		
Réfrigération:	IC8A1W7 (Hydro-réfrigérant)	Ventilation: Autoventilé	Raccordement: Non
Réfrigérant:	Fluide: Eau	Température °C: 25	Simple tube

Raccordement et régulation:			
Nombre de fils:	6 Fils		
Point neutre:	Neutre raccordé	Maintien de Icc:	Supérieur à 3 x In pendant 10 sec.
Marche parallèle:	Avec réseau (3-Fonctions)	Schéma catalogue:	
Type de régulation:	AREP		
Type de régulateur:	R630	En armoire	
Détection tension:	TP de détection embarqués dans la boîte à bornes		
Marche manuelle:	Marche manuelle suiveuse avec commutateur		
Carte 4-20 mA:	Oui		
Potentiomètre tension:	Potentiomètre consigne tension digital		
Potentiomètre cos phi:	Potentiomètre consigne cosØ digital		
Antiparasitage:	Classe N		

Données électriques:											
Rendements:	110%	100%	75%	50%	25%						
Cosinus phi 0,8:	97,4 %	97,4 %	97,1 %	96,3 %	93,6 %						
Cosinus phi 1,0:	97,9 %	97,9 %	97,5 %	96,6 %	93,7 %						
Réactances et constantes de temps:	Xd	Xq	X'fd	X''fd	X''fq	X2	Xo	T'do	T'd	T''d	Ta
	260	143	36,6	26,2	32,6	29,4	18,3	6,56	0,94	0,034	0,265
Kcc:	0,41	Non saturées par rapport à Pn %						Secondes			

Conception d'une rame automotrice

Une rame automotrice est une rame où toutes les caisses (voiture) sont quasiment indifférenciées (à l'exception des deux caisses d'extrémités équipées de cabine de pilotage) contrairement à un train formé d'une locomotive et de wagons de voyageurs. Toutes les caisses sont composées de deux bogies et chaque bogie est équipé de deux essieux (motorisés ou non). Le bogie est l'élément porteur sur lequel la caisse repose. Un bogie motorisé est équipé d'un moteur et d'un réducteur par essieu. Un essieu est composé de deux jantes (roues).



La chaîne de traction a pour rôle de capter l'énergie électrique, de la transformer et de la distribuer à l'intérieur du train. La fonction principale étudiée concerne la distribution de l'énergie de la ligne externe (la caténaire) aux jantes motorisées.

DT 5

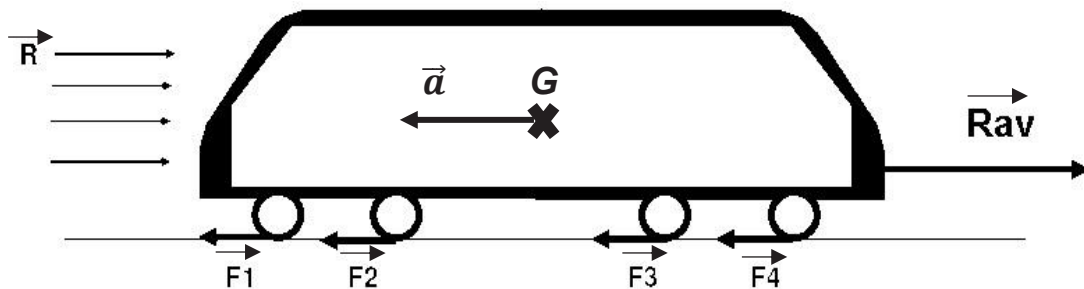
Modélisation de la résistance à l'avancement

Sur le schéma ci-dessous, le train, symbolisé par une seule caisse avec tous ses essieux motorisés, se déplace vers la gauche.

\vec{F}_t : somme des forces de traction.

$\vec{F}_t = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \vec{F}_4$, les \vec{F}_i correspondent aux forces de traction par essieu.

$\vec{R}_{av} = \sum \vec{R}$ = effort résistant à l'avancement voire formule de Davis détaillée ci-dessous.



\vec{a} : accélération du train s'appliquant au centre de gravité du train en G.

Masse à vide de la rame automotrice (6 caisses supportées par 2 bogies à double essieux) en ordre de marche avec chaînes de traction (CdT) comprises : 240 t (on peut considérer ici pour simplifier que cette masse ne varie pas quel que soit le nombre de CdT et qu'il y a équirépartition de cette masse sur l'ensemble des essieux).

$M_s = 270$ t : Masse statique en charge nominale (C_N), soit 400 personnes ($75 \text{ kg} \cdot \text{pers}^{-1}$).

M_v : Masse virtuelle = Masse statique (M_s) + Masses équivalentes tournantes (liées au moment d'inertie des pièces en rotation).

Selon la **formule de Davis** : $R_{av} = A + B \cdot V + C \cdot V^2$

Notations :

R_{av} : résistance à l'avancement en Newton (N).

V : Vitesse instantanée en $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$, (v = vitesse instantanée en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).

A : Force de résistance au roulement en Newton (N).

B : Coefficient de friction en $\text{N} \cdot (\text{km} \cdot \text{h}^{-1})^{-1}$.

C : Coefficient aérodynamique $\text{N} \cdot (\text{km} \cdot \text{h}^{-1})^{-2}$.

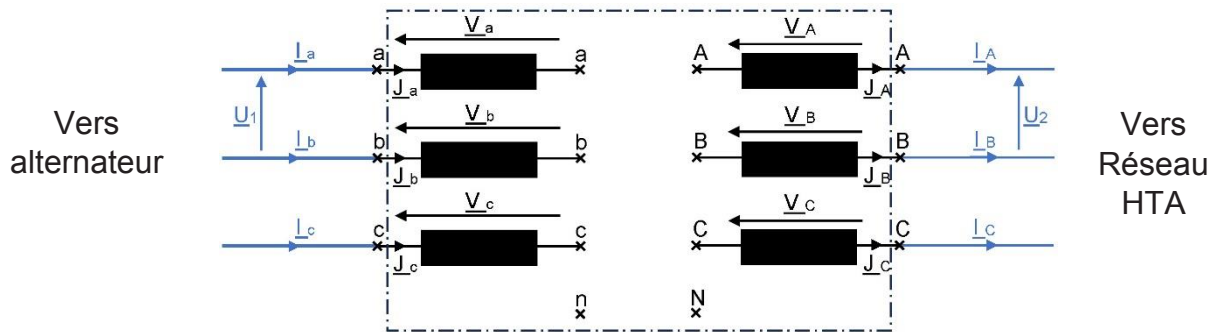
Le terme A dépend essentiellement de la masse du train. Le terme B correspond au frottement visqueux. Le terme C dépend de la surface frontale du train et de son coefficient de pénétration dans l'air, de sa longueur et du nombre de césures inter-caisses.

$A = 4584 \text{ N}$ $B = 44 \text{ N} \cdot (\text{km} \cdot \text{h}^{-1})^{-1}$ $C = 0,71 \text{ N} \cdot (\text{km} \cdot \text{h}^{-1})^{-2}$

NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE

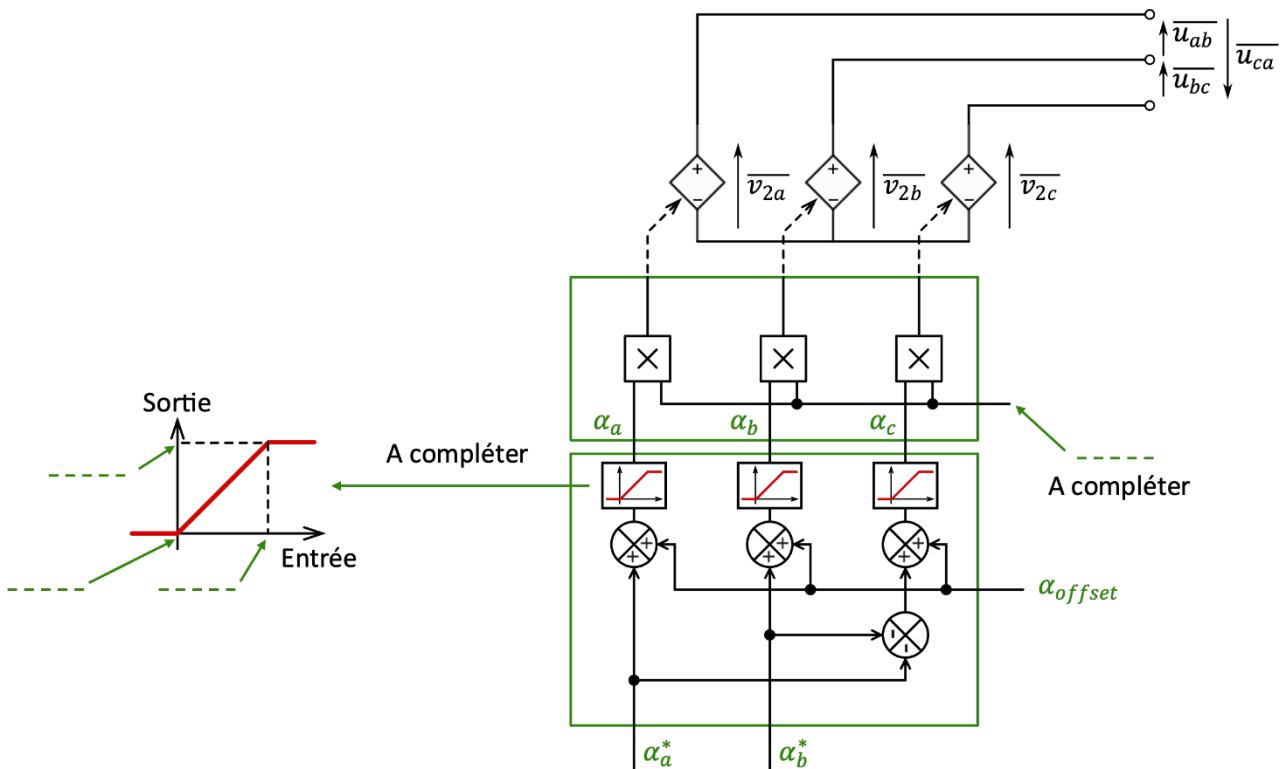
Document réponse DR1

Question 20 : Couplage du transformateur

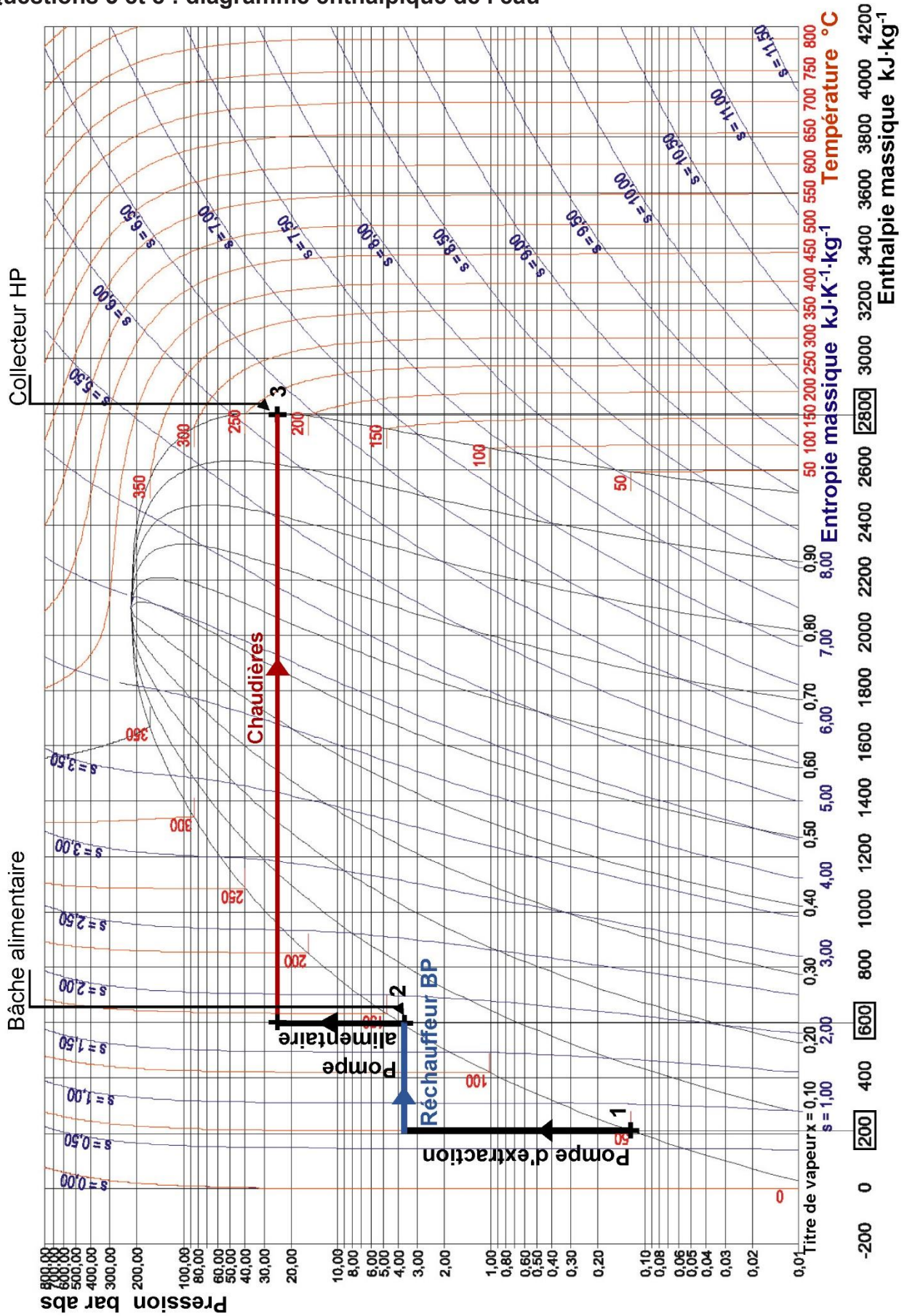


Question 51 : Schéma équivalent du modèle moyen de l'onduleur

Dans ce schéma apparaissent des sources de tension commandées dont le symbole électrique diffère de celui d'une source de tension de forme d'onde imposée. Pour ces sources, la valeur instantanée de la tension générée par la source est fixée par un signal de commande.



Questions 5 et 8 : diagramme enthalpique de l'eau



Document réponse DR3

Questions 11, 12 et 13 : plan de fonctionnement de l'alternateur

