

SESSION 2025

CAPET
CONCOURS EXTERNE ET CAFEP CORRESPONDANT
ET TROISIEME CONCOURS

Section : SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR

Option : INGÉNIERIE ÉLECTRIQUE

ÉPREUVE ÉCRITE DISCIPLINAIRE

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.

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 externe du CAPET de l'enseignement public :**

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
E D E	1 4 1 2 E	1 0 1	9 3 1 1

► **Concours externe du CAFEP/CAPET de l'enseignement privé :**

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
E D F	1 4 1 2 E	1 0 1	9 3 1 1

► **Troisième concours externe du CAPET de l'enseignement public :**

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
E D V	1 4 1 2 E	1 0 1	9 3 1 1

Étude d'un réseau d'électrification dans un site isolé à l'île de La Réunion

Mise en contexte :

Au cours des dix dernières années, une proportion sans précédent de la population mondiale a obtenu l'accès à l'électricité, mais le nombre de personnes privées d'électricité en Afrique subsaharienne a en réalité augmenté. Si les pays affichant les plus importants déficits n'intensifient pas considérablement leurs efforts, le monde ne pourra toujours pas garantir l'accès de tous à une énergie abordable, fiable, durable et moderne à l'horizon 2030. C'est ce qu'affirme le rapport intitulé Tracking SDG 7: The Energy Progress Report publié en juin 2021 par l'Agence internationale de l'énergie (AIE), l'Agence internationale pour les énergies renouvelables (IRENA), le Département des affaires économiques et sociales des Nations Unies (UNDESA), la Banque mondiale et l'Organisation mondiale de la Santé (OMS).

Le nombre de personnes privées d'accès à l'électricité dans le monde a baissé, passant de 1,2 milliard en 2010 à 759 millions en 2019. L'électrification au moyen de solutions renouvelables décentralisées a connu un essor particulièrement significatif. Le nombre de personnes raccordées à des mini réseaux a plus que doublé entre 2010 et 2019, passant de 5 millions à 11 millions d'individus. Pour autant, au regard des politiques actuelles et futures et des effets de la crise de la COVID-19, on estime que 660 millions de personnes n'auront toujours pas accès à l'électricité en 2030, en Afrique subsaharienne pour la plupart.

La situation de Mafate à l'île de la Réunion :



Coupé du monde au cœur du Parc national de La Réunion, situé dans un cirque au relief très escarpé, possédant un foncier restreint, le cirque de la nouvelle est classé au patrimoine mondial de l'UNESCO. Ce hameau ne peut compter que sur le soleil pour produire son électricité. Alimenté jusque-là par des panneaux photovoltaïques vieillissants, la croissance du tourisme l'oblige à augmenter et stabiliser sa production.

Il n'est desservi par aucune route, n'est pas connecté au réseau électrique, est ravitaillé par hélicoptère et pourtant 100 000 personnes le visitent chaque année. L'économie du cirque de Mafate et ses dix îlets (hameaux) peuplés par environ 700 habitants (310 familles) est très dépendante du tourisme. Les besoins en électricité augmentent, mais les installations de production se dégradent et ne permettent plus de satisfaire la demande.

Les 310 foyers et 13 gîtes équipés, il y a une vingtaine d'années, de panneaux photovoltaïques, se tournent désormais vers des groupes électrogènes. Selon un habitant, ils consommeraient environ 50 000 litres de carburant par an. Il faut donc trouver une solution pour éviter de transformer ce site naturel en un espace pollué et dépendant des énergies fossiles sur le long terme.

Un système développé par une start-up française

À La Nouvelle, l'îlet le plus peuplé du cirque de Mafate, EDF expérimente un système de stockage de l'énergie solaire via des batteries lithium-ion et de l'hydrogène. Développée par la start-up française Powidian, la technologie baptisée « SAGES » (Smart Autonomous Green Energy System) permet d'emmagasiner l'électricité excédentaire produite par les panneaux photovoltaïques installés sur les toits des bâtiments publics.

Stockée dans des batteries pour un usage à court terme, l'électricité peut également être convertie en hydrogène via un électrolyseur. Conservé dans un réservoir, il peut ensuite être retransformé en électricité grâce à une pile à combustible et injecté dans un micro-réseau selon les besoins. Lors de longues périodes sans ensoleillement, les habitants peuvent donc théoriquement continuer à être alimentés. Un premier dispositif a vu le jour en février 2016 sur le toit de l'école de La Nouvelle, avant un éventuel déploiement à plus grande échelle dans les autres îlets.

Partie 1 : étude et analyse des besoins énergétiques du site isolé

Objectifs : comparer plusieurs solutions possibles pour faire face aux besoins énergétiques du site isolé.

Le mixte énergétique d'électrification a consisté à recourir à des groupes électrogènes. Le site étant accessible par des sentiers de randonnée (aucune route de desserte), le ravitaillement en fioul se faisait par des rotations d'hélicoptère.

Les autres sources sont des panneaux photovoltaïques associés à du stockage individuel.

Bilan énergétique des habitations

Q1. À partir du document technique DT1 (Bilan statistique de consommation des équipements d'un foyer et équipement type d'un gîte) **faire** le bilan de consommation annuelle d'un foyer et d'un gîte. **Compléter** les tableaux du document réponse DR1. **En déduire** l'énergie consommée (E_{TOT}) par l'ensemble des habitations du cirque sur un an.

Dans le cadre d'un premier scénario, on envisage de recourir exclusivement à des groupes électrogènes diesel. Un synoptique de l'installation est consigné sur le document DT2.

On cherche à évaluer la quantité annuelle de fuel requise pour les groupes électrogènes et estimer le coût du kilowattheure (kWh).

Le réseau serait maillé avec plusieurs groupes de 250 kVA. On admet que l'énergie annuelle consommée par l'ensemble des habitations et des équipements publics du cirque est $E_{TOT} = 1,3 \cdot 10^9$ Wh.

Le tarif du fuel est $T_{fuel} = 1\,170$ € pour 1 000 litres. Son ravitaillement se fait en hélicoptère. Il permet de transporter 700 litres de fuel pour un coût $T_{vol} = 400$ €.

Q2. Exprimer puis calculer la quantité annuelle de fuel Q_F requise pour alimenter le hameau de la Nouvelle en énergie électrique. **En déduire** le prix du kilowattheure délivré aux habitants, comparer avec le prix du distributeur public EDF (environ 0,25 € le kWh).

L'estimation du prix montre que la solution basée uniquement sur les groupes électrogènes est prohibitive. Aussi, on envisage d'exploiter les ressources énergétiques renouvelables comme le soleil.

On propose d'alimenter le cirque en utilisant exclusivement des panneaux photovoltaïques. On admet que les panneaux photovoltaïques ont un rendement de $\eta_P = 18,9 \%$.

Étude du potentiel d'énergie solaire

Sur le document technique DT3 est consignée la courbe de l'irradiance sur le site durant deux jours consécutifs.

Q3. Analyser et commenter l'allure de la courbe de l'irradiance (régularité, disponibilité, amplitude...).

Le document technique DT4 montre les détails de l'irradiance sur une durée de trois minutes. Afin d'estimer le potentiel solaire, on effectue une approche numérique par une méthode de Riemann à pas constant d'ordre 0 (méthode des rectangles à droite).

Q4. Préciser le pas du relevé (noté Pas). **Calculer** l'énergie surfacique (E_s en Wh) reçue sur ces trois minutes.

On dispose des relevés de l'irradiance horaire moyenne du site sur une année complète. On souhaite les exploiter pour quantifier la ressource solaire disponible. Le traitement du calcul de l'énergie est fait numériquement grâce à l'algorithme fourni sur le document réponse DR2. Les données proviennent d'un fichier au format .csv dont le format est le suivant :

Temps (s)	Valeur de l'irradiance Φ ($W \cdot m^{-2}$)
t	Valeur 1
t + 1 heure	Valeur 2
t + 2 heures	Valeur 3
.....
t_final	Valeur finale

Q5. Compléter l'algorithme du document DR2 afin de calculer et d'afficher la valeur de l'énergie surfacique annuelle reçue par les panneaux photovoltaïques (en $kWh \cdot m^{-2}$).

Le calcul issu du programme donne une énergie surfacique annuelle reçue $E_{san} = 1\,447 kWh \cdot m^{-2}$. Le synoptique du document technique DT5 donne l'architecture simplifiée de l'installation. Le stockage de l'énergie permet de maintenir l'alimentation en l'absence de soleil.

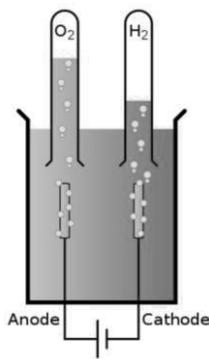
Q6. En considérant un rendement unitaire pour la batterie lors de la charge et de la décharge, **calculer** la surface des panneaux photovoltaïques ($S_{TPanneau}$) nécessaire pour subvenir aux besoins énergétiques journaliers du village de La Nouvelle.

Q7. Conclure sur la possibilité d'alimenter tout le hameau en utilisant uniquement les groupes électrogènes ou uniquement des cellules photovoltaïques.

Étude du stockage hydrogène et de l'hybridation avec la solution lithium au sein du microgrid

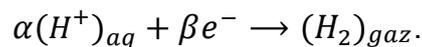
Dans cette partie il s'agit de déterminer la quantité d'énergie pour fabriquer l'hydrogène, l'énergie disponible après son stockage et de caractériser l'efficacité de la chaîne d'énergie dont le vecteur est le dihydrogène.

Étude du principe de décomposition de l'eau H_2O .

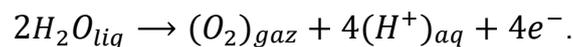


On obtient de l'hydrogène par électrolyse de l'eau.

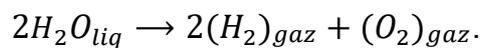
Le courant électrique dissocie la molécule d'eau H_2O en ions hydroxyde HO^- et hydrogène H^+ : dans la cellule électrolytique, les ions hydrogène acceptent des électrons à la cathode dans une réaction d'oxydoréduction en formant du dihydrogène gazeux H_2 , selon la réaction de réduction, à la cathode on forme du H_2 :



Sur l'anode une oxydation des ions hydroxyde qui perdent donc des électrons se produit afin de « fermer » le circuit électrique (équilibre de la réaction chimique en charges) :



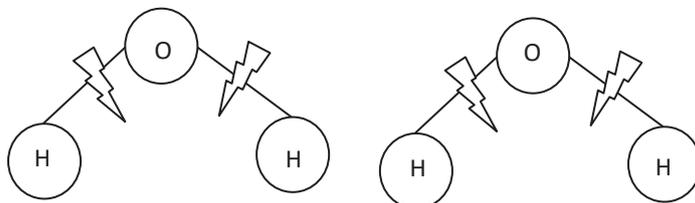
Ce qui provoque la production d'eau liquide, de dihydrogène gazeux et de dioxygène gazeux selon l'équation suivante :



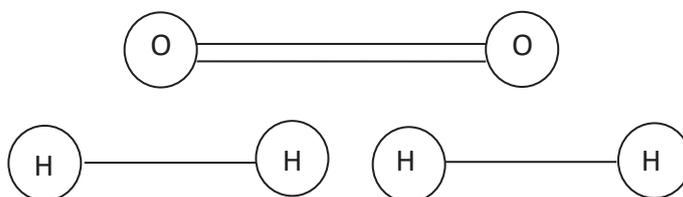
Bilan énergétique pour fabriquer 1 kg d'hydrogène

Pour parvenir à former du dihydrogène gazeux et du dioxygène gazeux à partir de deux molécules d'eau H_2O il faut briser 4 liaisons $O - H$ puis reconstruire 2 liaisons $H - H$ et 1 liaison $O - O$.

On doit d'abord apporter de l'énergie pour briser les liaisons des molécules d'eau :



Puis on soustrait de l'énergie lors de la construction des molécules H_2 et O_2 .



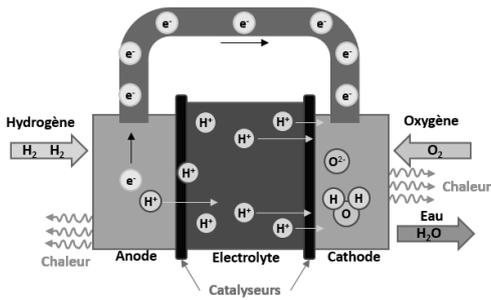
On donne dans le tableau ci-dessous quelques énergies de liaison :

Energie de quelques liaisons (en $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$)					
O=O	498	C-O	358	F-F	148
O-O	146	C=O	799	Cl-Cl	242
$C_{(s)}$	717	C-F	429	Br-Br	224
C-C	347	C-Cl	339	I-I	214
C=C	614	C-Br	275	H-H	436
$C\equiv C$	839	N-Cl	200	H-cl	427
C-H	413	$N\equiv N$	941	H-O	461

Q8. Montrer que l'énergie utile pour obtenir une mole de H_2 est $E_U=237 \text{ kJ}$. La masse molaire de l'hydrogène est $m_H=1\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$, **en déduire** alors l'énergie utile (E_{UH}) pour fabriquer 1 kg d'hydrogène. **Donner** cette énergie en kWh.

Pour fabriquer l'hydrogène on utilise un électrolyseur ayant un rendement $\eta_E=57 \%$.

Q9. Calculer l'énergie électrique (E_{EH}) qu'il faudrait fournir pour fabriquer 1 kg d'hydrogène.



Pour fabriquer de l'électricité en utilisant l'hydrogène, on utilise une pile à combustible (PAC) qui en recombinant le dihydrogène avec le dioxygène produit de l'eau.

Le rendement de la pile à combustible est $\eta_p = 50\%$.

Q10. Calculer l'énergie électrique (E_{ER}) que l'on pourrait récupérer avec 1 kg d'hydrogène.

Q11. Compléter le document réponse DR3 en donnant les valeurs de l'énergie électrique fournie à l'électrolyseur (E_{EH}), celle nécessaire pour fabriquer 1 kg d'hydrogène (E_{UH}) et celle restituée par la PAC (E_{ER}). **Donner** le rendement global (η_{global}) de la solution basée sur l'hydrogène.

On donne la loi des gaz parfait : $P \cdot V = n \cdot R \cdot (T + 273)$ où :

P est la pression en Pa ; V le volume occupé par le gaz en m^3 ; n le nombre de moles ; R la constante universelle des gaz parfaits ($R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) et T la température en $^{\circ}\text{C}$.

On rappelle que $1 \text{ bar} = 1\,013 \text{ hPa}$.

Q12. Calculer le volume occupé par 1 kg d'hydrogène à température ambiante de 25°C à la pression atmosphérique ($1\,013 \text{ hPa}$).

On souhaite avoir suffisamment d'hydrogène pour alimenter les habitations du cirque pendant une journée.

Q13. Calculer le volume d'hydrogène qu'il faudrait stocker si on reste à la pression atmosphérique puis si on comprime le gaz à 500 bars, puis **comparer** ces deux solutions.

Partie 2 : étude de l'architecture fonctionnelle et structurelle d'un sous-réseau d'électrification

Objectif : cette partie vise à identifier les fonctions et les éléments structurels qui concourent aux transferts de puissance et à valider leurs performances.

L'architecture retenue utilise des panneaux photovoltaïques, du stockage d'énergie à l'aide de batterie lithium et une pile à combustible associée à un électrolyseur et un stockage d'hydrogène. L'étude porte sur l'installation d'un foyer. Le synoptique global est donné sur le document technique DT6.

Q14. Compléter le document réponse DR4 en donnant le nom et la fonction des convertisseurs CV1 à CV3.

Étude du convertisseur CV1 dans le cadre d'un pilotage MPPT

Q15. Préciser la signification du sigle MPPT pour un convertisseur. **Donner** l'avantage de cette commande.

On donne les courbes d'intensité du courant en fonction de la tension et de la puissance en fonction de la tension en sortie du champ photovoltaïque sur le document technique DT7 et les caractéristiques d'un panneau du champ sur le document technique DT5.

La tension nominale du champ photovoltaïque est $U_{nom} = 317 \text{ V}$ et le courant nominal $I_{nom} = 9,47 \text{ A}$.

Q16. Calculer le nombre de panneaux qui composent le champ photovoltaïque. **Préciser** le raccordement de ces panneaux puis **calculer** la puissance nominale P_{nom} et la surface du champ photovoltaïque.

Cas n°1 : on se place au point de fonctionnement P_1 qui correspond à la tension $U_1 = 195 \text{ V}$ et au courant $I_1 = 7,5 \text{ A}$. Pour être plus efficace, le panneau doit délivrer sa puissance maximale. Un algorithme de commande impose au panneau la tension $U_1 + \Delta V$ (ΔV très petit et positif).

Cas n°2 : on se place ensuite au point de fonctionnement P_2 qui correspond à la tension $U_2 = 340 \text{ V}$ et au courant $I_2 = 7,5 \text{ A}$. L'algorithme de commande impose toujours au panneau la tension $U_2 + \Delta V$ (ΔV très petit et positif).

Q17. Indiquer le signe de la variation de puissance dP dans les deux cas.

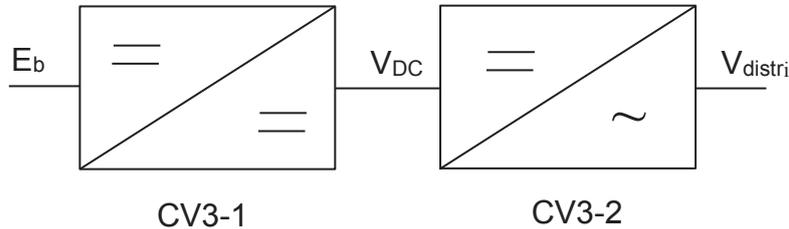
Q18. Expliquer comment le régulateur MPPT opère dans les deux cas pour permettre au convertisseur CV1 de fournir le maximum de puissance.

La tension E_b (voir le document technique DT6) est liée à la tension U_{PV} par une fonction de modulation f_m telle que $U_{PV} = f_m \cdot E_b$.

Q19. À l'aide des documents techniques DT6 et DT7, pour les points P_1 , P_{max} (qui correspond au point nominal) et P_2 **calculer** la valeur de f_m puis **déterminer** la fonction de CV1 et **justifier** la présence de CV1 au sein de l'installation.

Étude des grandeurs électriques à la sortie du convertisseur CV3.

Les schémas du convertisseur CV3 sont donnés sur les documents techniques DT8 et DT9. CV3 est composé de deux convertisseurs CV3-1 et CV3-2 conformément au synoptique ci-dessous :



Étude du convertisseur CV3-2

L'utilisation est modélisée par une résistance $R_0 = 17,7 \Omega$ et une inductance $L = 10 \text{ mH}$. On simplifie l'étude en considérant que le convertisseur est commandé en pleine onde. Sur ce schéma la tension à l'entrée est considérée constante $V_{DC} = 230 \text{ V}$. Le convertisseur CV3-2 fonctionne à une fréquence $F = 50 \text{ Hz}$.

Q20. Compléter le document réponse DR5 en dessinant l'allure de V_{com} et $V_{distrib}$.

Q21. Calculer la valeur efficace de la tension $V_{distrib}$.

La charge consomme une puissance nominale $S_{distrib} = 3 \text{ kVA}$.

Q22. Calculer les puissances active ($P_{distrib}$) et réactive ($Q_{distrib}$) consommées par la charge.

Q23. Le calcul du THD_{fond} (Total Harmonic Distortion) de la tension $V_{distrib}$ donne $\text{THD} = 0,48$. **Commenter** ce résultat en termes de qualité de l'onde produite par CV3-2.

Étude du convertisseur CV3-1

La structure du convertisseur CV3-1 est donnée sur le document technique DT9. Tous les interrupteurs sont considérés comme parfaits, le rendement de CV3-1 est unitaire.

Pour simplifier, l'étude porte dans un premier temps sur le schéma du document technique DT10.

Q24. Compléter le document réponse DR6 en indiquant la possibilité de viabilité des combinaisons des états des interrupteurs Q_1 et D_1 . **Argumenter** la réponse.

On note :

- v_{L1} la tension aux bornes de l'inductance L1,
- i_{L1} l'intensité du courant dans l'inductance L1,
- v_{Q1} la tension aux bornes du transistor Q1,
- i_{Q1} l'intensité du courant dans le transistor Q1,
- v_{D1} la tension aux bornes de la diode D1,
- i_{D1} l'intensité du courant dans la diode D1,
- v_{DC} la tension délivrée par CV3 partie 1,
- E_b la tension aux bornes de la batterie,
- i_b l'intensité du courant dans la batterie.

Q25. Sur le document réponse DR7 **flécher** les tensions E_b , v_{L1} , v_{Q1} , v_{D1} et v_{DC} ainsi que les courants i_b , i_{L1} , i_{Q1} , i_{D1} .

Q26. Écrire les lois générales de Kirchhoff qui lient les grandeurs fléchées à la question Q25.

Pour la question suivante, on considère un fonctionnement en régime permanent. On étudie un premier temps uniquement le comportement de Q1 et D1. On considère que tous les interrupteurs sont parfaits. L'étude se base sur le schéma simplifié du document technique DT10.

Le transistor Q1 est commandé par un signal logique de rapport cyclique noté α avec une période notée T.

Q27. Pour $t \in]0; \alpha T]$ puis pour $t \in]\alpha T; T]$, en utilisant les lois de Kirchhoff données précédemment, **déterminer** l'expression littérale de l'intensité du courant i_{L1} sur les deux intervalles.

Q28. Dessiner l'allure temporelle de i_{L1} sur le document réponse DR8.

L'étude se base maintenant sur le schéma du document technique DT9. La commande de l'interrupteur Q2 est décalée de $\frac{T}{2}$ par rapport à celle de Q1.

Q29. Donner l'expression temporelle de i_{L2} pour $t \in]\frac{T}{2}; \frac{T}{2} + \alpha T]$ puis pour $t \in]\frac{T}{2} + \alpha T; \frac{3.T}{2}]$.

Q30. Dessiner l'allure temporelle de i_{L2} en correspondance avec celle de i_{L1} sur le document réponse DR8.

L'allure de i_b et celle de i_s sont données sur le document technique DT11.

Q31. Exprimer la valeur moyenne de i_s en fonction de α et du courant moyen dans batterie notée i_b .

Q32. En faisant un bilan de puissance, **exprimer** V_{DC} en fonction de α et de E_b puis **conclure**.

Partie 3 : Étude de l'asservissement de la tension du bus continu

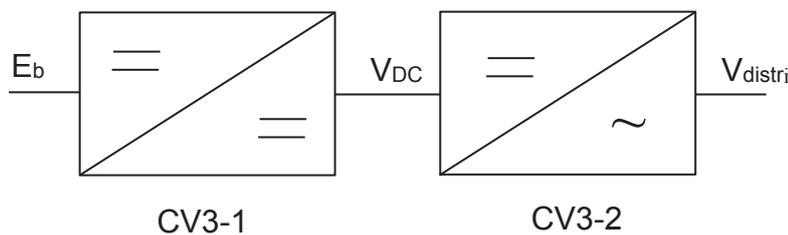
Dans cette partie, il s'agit de justifier la nécessité de contrôler la tension du bus continu, d'établir un modèle du convertisseur dans l'optique d'identifier le type de correcteur à mettre en œuvre pour obtenir un asservissement et une régulation de la tension V_{DC} délivrée à l'onduleur.

La batterie est composée d'un assemblage de cellules en série dont la tension nominale $V_{CEN} = 3,69$ V. La tension nominale de la batterie est $E_{bN} = 48$ V.

On note :

V_{DC} la tension délivrée par CV3-1,

V_{distri} la tension délivrée par CV3-2.



Q33. Calculer le nombre de cellules qui composent la batterie.

L'évolution de la tension aux bornes de la batterie en fonction de l'état de charge est donnée sur le graphe du document technique DT12.

Q34. Calculer la variation de la tension aux bornes de la batterie ΔE_b entre une pleine charge et la fin de décharge pour une profondeur de décharge de 85 % qui correspond à une tension aux bornes de la cellule $V_{CE} = 3,3$ V.

On a $V_{DC} = \frac{E_b}{(1-\alpha)}$; on fait l'hypothèse que la valeur efficace de V_{distri} est $V_{distriE} = V_{DC}$.

On précise que la valeur efficace nominale de V_{distri} est $V_{distriEN} = 230$ V et que le rapport cyclique nominal est $\alpha_{nom} = 0,79$.

Q35. Dans le cas d'un maintien du rapport cyclique à sa valeur nominale, **calculer** $V_{distriE}$ lorsque la batterie est complètement chargée puis déchargée à 85 %. **Conclure** sur le respect de la réglementation qui prévoit de maintenir la tension efficace du réseau de distribution à plus ou moins 10 % de sa valeur efficace nominale.

L'étude précédente a montré que la tension du bus continu et celle de la tension de distribution dépendent de la tension de la batterie. Il est donc nécessaire d'ajuster le réglage du convertisseur CV3 lorsque la tension aux bornes de la batterie varie afin de maintenir la tension $V_{distriE}$ constante.

Pour éviter cette variation, on peut agir sur la commande du convertisseur CV1 ou mettre en place une stratégie de contrôle du bus continu. L'étude suivante propose de fixer la commande de CV1 et d'agir sur CV3-1 (voir documents techniques DT8, DT9 et DT10) pour maintenir V_{DC} et la valeur efficace de V_{distri} constante.

Il convient d'asservir et de réguler le niveau de la tension du bus continu délivré à l'onduleur. L'étude est menée autour d'un point de repos. Afin de s'affranchir de la non-linéarité intrinsèque due aux commutations, la méthode mise en œuvre est basée sur les « modèles moyens », dits aussi « en comportements moyens » autour d'un point de repos. On admet que le fonctionnement reste dans le domaine linéaire.

On peut écrire :

$$\begin{aligned} E_b(t) &= E_{b0} + \delta E_b, \\ \alpha(t) &= \alpha_0 + \delta\alpha, \\ I_L(t) &= I_{L0} + \delta I_L, \\ V_{DC}(t) &= V_{DC0} + \delta V_{DC}. \end{aligned}$$

Les grandeurs (g) indicées 0 sont les valeurs moyennes (composantes continues) et les grandeurs δg représentent les « petites » modulations.

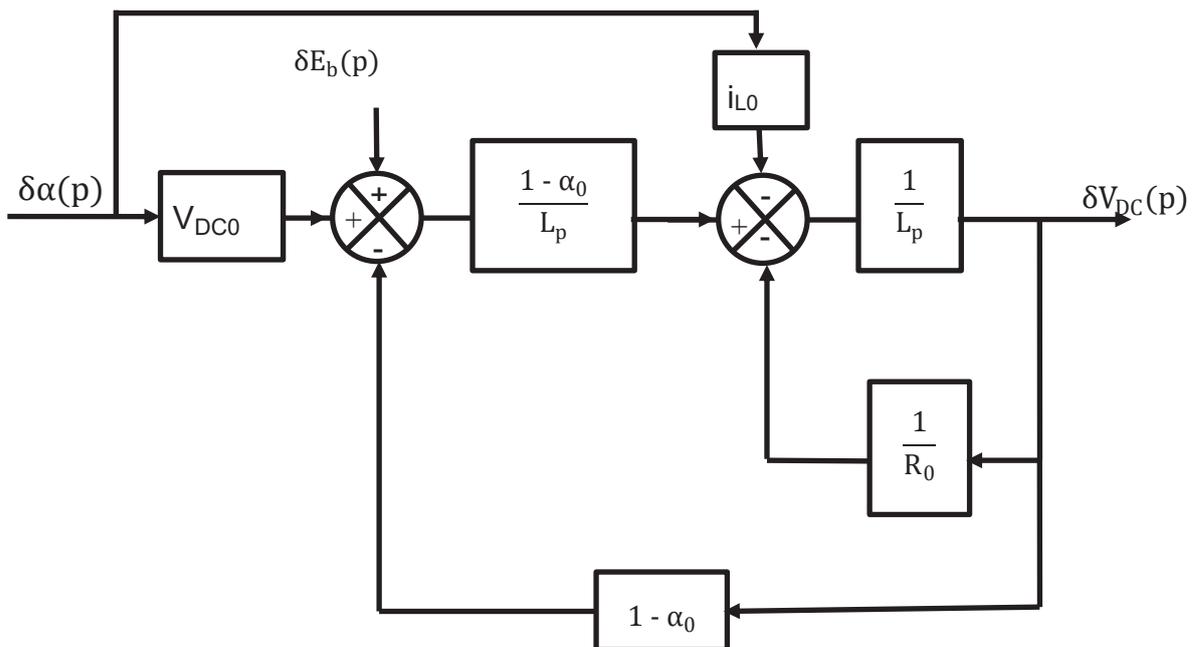
Le point de repos qui correspond au point de fonctionnement moyen est caractérisé par l'équation $1 - \alpha_0 = \frac{E_{b0}}{V_{DC0}} = \frac{48}{230}$ et une puissance $P_{S0} = 3 \text{ kW}$ délivrée à la résistance R_0 qui est alimentée par une tension $V_{DC} = 230 \text{ V}$.

La résistance R_0 traduit la consommation de puissance au niveau du bus continu au point de repos.

Q36. Exprimer puis calculer la valeur de R_0 en fonction de V_{DC} et P_{S0} .

Pour la suite on prendra $R_0 = 17,7 \Omega$, $L = 10 \text{ mH}$ et $C = 220 \mu\text{F}$.

L'étude de la modélisation dans l'espace d'état moyen conduit au schéma bloc suivant du convertisseur élévateur CV3-1, où p désigne la variable de Laplace :



Dans ce schéma-bloc :
$$\begin{cases} V_{DC0} &= \frac{1}{1-\alpha_0} \cdot E_{b0} \\ i_{L0} &= \frac{1}{R_0 \cdot (1-\alpha_0)^2} \cdot E_{b0} \end{cases}$$

$\delta V_{DC}(p)$ peut se mettre sous la forme suivante :

$\delta V_{DC}(p) = H_1(p) \cdot \delta E_b(p) + (H_2(p) \cdot V_{DC0} + H_3(p) \cdot i_{L0}) \cdot \delta \alpha(p)$, où $H_1(p)$, $H_2(p)$ et $H_3(p)$ sont trois fonctions de transfert à déterminer.

Pour faciliter la résolution, on utilise la méthode de superposition.

Q37. Montrer que pour $\delta E_b(p) = 0$ on a :

$$\frac{\delta V_{DC}(p)}{\delta \alpha(p)} = \frac{(1-\alpha_0) \cdot V_{DC0} \cdot L \cdot p \cdot i_{L0}}{(1-\alpha_0)^2 + \frac{L}{R_0} \cdot p + L \cdot C \cdot p^2}, \text{ en déduire les expressions de } H_2(p) \text{ et } H_3(p).$$

Q38. En déduire que
$$\frac{\delta V_{DC}(p)}{\delta \alpha(p)} = \frac{E_{b0}}{(1-\alpha_0)^2} \cdot \frac{1 - \frac{L}{R_0 \cdot (1-\alpha_0)^2} \cdot p}{1 + \frac{L}{R_0 \cdot (1-\alpha_0)^2} \cdot p + \frac{LC}{(1-\alpha_0)^2} \cdot p^2}.$$

Q39. Déterminer puis **calculer** la valeur finale de la tension du bus continu lorsque le rapport cyclique α évolue de 1 % sous la forme d'un échelon.

On souhaite maintenant connaître le comportement du convertisseur pour une variation de la tension de la batterie. Dans cet objectif, la variation du rapport cyclique est nulle ($\delta \alpha(p) = 0$).

Q40. Montrer que dans ce cas :
$$\frac{\delta V_{DC}(p)}{\delta E_b(p)} = \frac{1}{(1-\alpha_0)} \cdot \frac{1}{1 + \frac{L}{R_0 \cdot (1-\alpha_0)^2} \cdot p + \frac{LC}{(1-\alpha_0)^2} \cdot p^2}. \text{ Conclure sur}$$

la variation de la tension du bus continu suite à une variation de type échelon unitaire de la tension aux bornes de la batterie.

On a consigné sur le document technique DT12 la réponse du convertisseur CV3-1 lors d'une excitation de type échelon.

Q41. Exprimer $\delta V_{DC}(p)$ dans le domaine de Laplace en prenant pour origine des temps $t_0 = 0,4$ s. **Donner** la valeur de α lors de cet essai. **Donner** en justifiant par un calcul la valeur finale de la tension du bus continu lors de cet essai.

Q42. Analyser de manière qualitative les difficultés de la mise en œuvre de la correction de ce système, avec en points de vigilance la stabilité, et la précision.

Document technique DT1 : équipement type d'un foyer

Appareils	Nombre
Réfrigérateur	1
Congélateur	1
Four micro-onde	1
Chargeur de smartphone	4
Ordinateur de bureau	1
Téléviseur LCD	1
Lave linge	1
Fer à repasser	1
Ampoule basse consommation	10
Autocuiseur	1

Équipement type d'un gîte

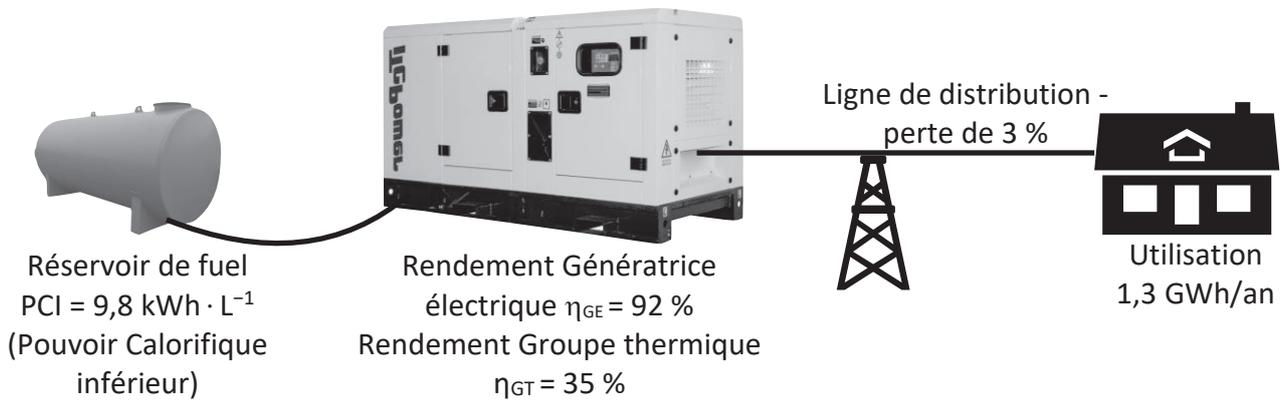
Appareils	Nombre
Réfrigérateur	2
Congélateur	2
Four micro-onde	1
Chargeur de smartphone	10
Ordinateur de bureau	1
Téléviseur LCD	1
Lave linge	1
Fer à repasser	1
Ampoule basse consommation	20
Autocuiseur	2
Four	1
Lave vaisselle	1
Sèche linge	1

Document technique DT1 (suite) : consommation électrique des équipements

Appareils	Puissance de l'appareil (W)	Période d'utilisation	Fréquence d'utilisation	Consommation moyenne annuelle (kWh)
Réfrigérateur	40 W	365 jours	En continu	350 kWh
Congélateur	130 W à 190 W	365 jours	En continu	1 402 kWh
Lave-vaisselle	1 200 W	48 semaines	5 fois par semaine	288 kWh
Four à micro-ondes	1 300 W	365 jours	5mn par jour	40 kWh
Four	2 000 W	365 jours	30mn par jour	365 kWh
Gaufrier	800 W à 1 200 W	15 jours	1h par jour	15 kWh
Aspirateur	1 500 W	52 semaines	2h par semaine	156 kWh
Chargeur de smartphone	5 W	365 jours	1h par jour	2 kWh
Ordinateur de bureau	90 W	365 jours	24h par jour	790 kWh
Ordinateur portable	30 W	365 jours	2h par jour	22 kWh
Téléviseur LCD	100 W	365 jours	3h par jour	110 kWh
Lave-linge	2 200 W	48 semaines	4 fois par semaine	422 kWh
Sèche-linge	2 500 W	32 semaines	2 fois par semaine	160 kWh
Fer à repasser	750 W	48 semaines	5h par semaine	180 kWh
Ampoule à incandescence	60 W	365 jours	5h par jour	110 kWh
Ampoule à basse consommation	12 W	365 jours	5h par jour	22 kWh
Autocuiseur	700 W	365 jours	1h par jour	255 kWh

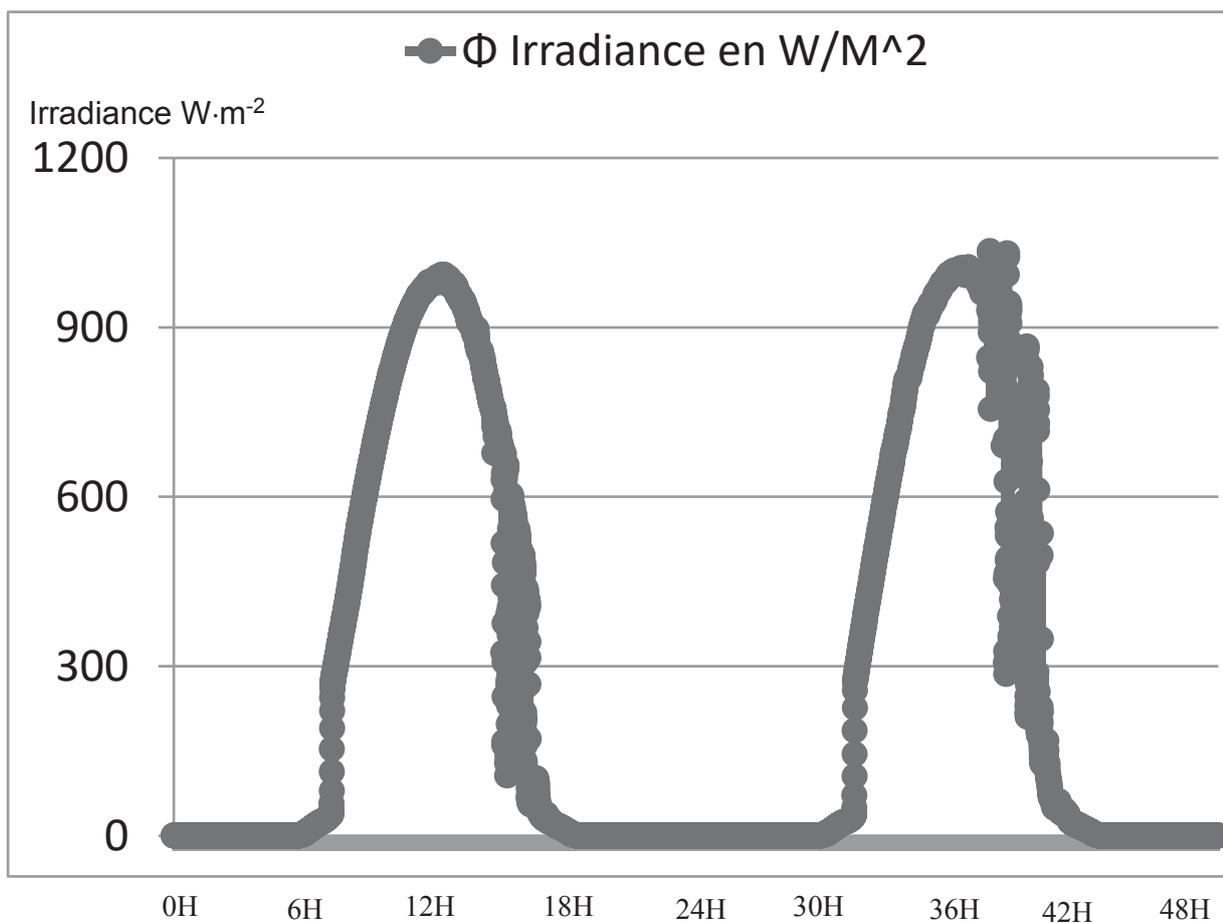
Source : <https://www.lelynx.fr/energie/comparateur-electricite/consommation-electrique/appareils/>

Document technique DT2 : synoptique de l'installation



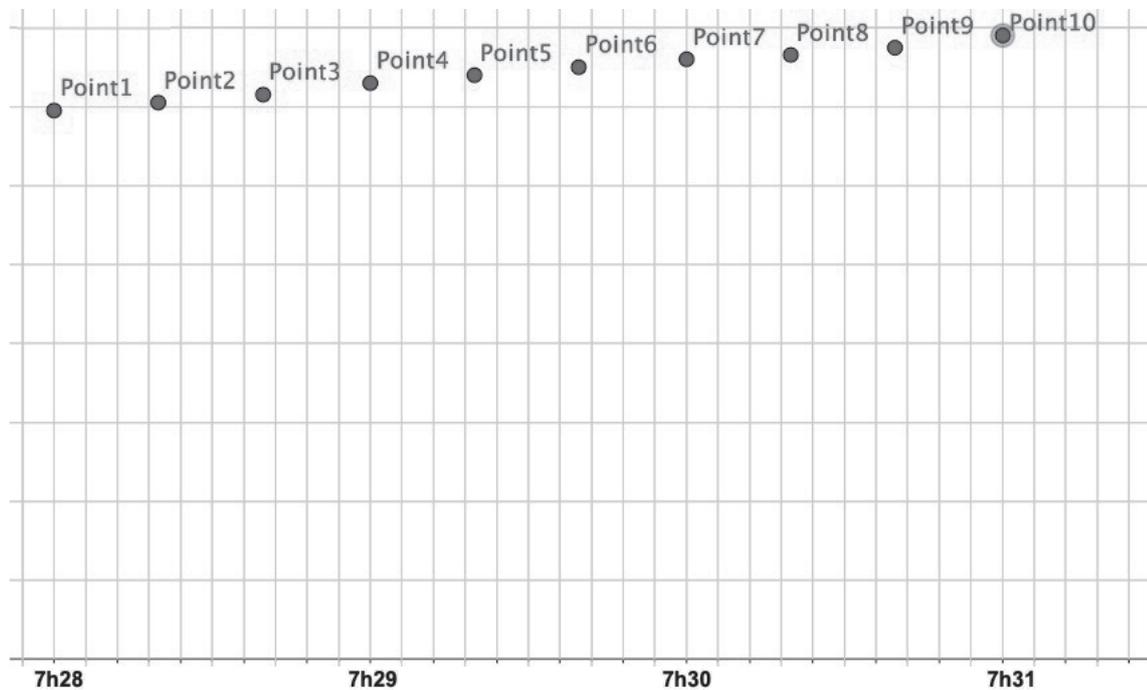
Document technique DT3

Les relevés d'irradiance notée ϕ sur deux jours (entre le 02/10/2021 à 00h00 et le 04/10/2021 à 00h00).



Document technique DT4

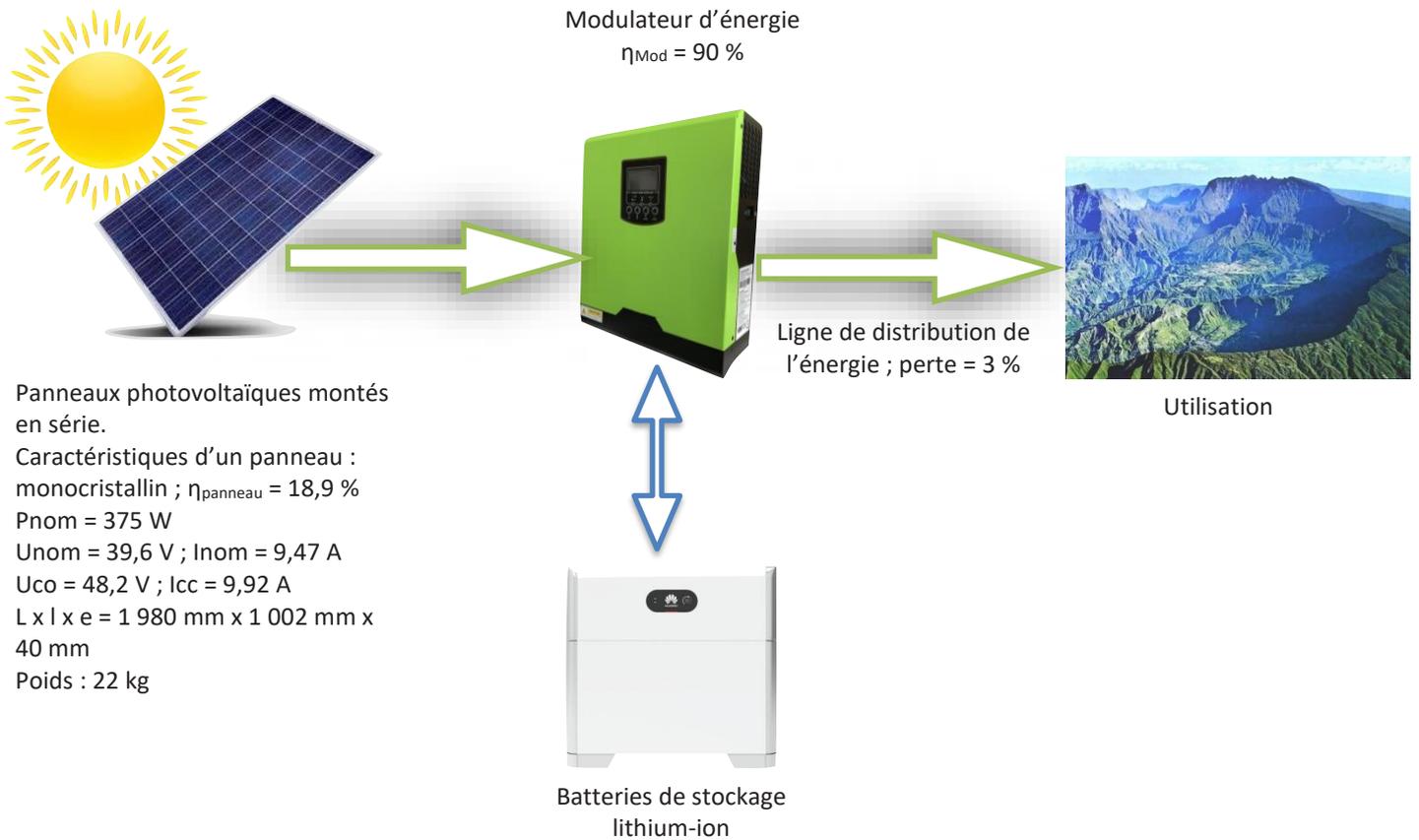
Zoom sur la journée du 02/10/2021 de 7h28 à 7h31 donnant : Φ Irradiance en $W \cdot m^{-2}$ en fonction du temps



Coordonnées des points 1 à 10

	Dates et heures	ϕ ($W \cdot m^{-2}$)
Point1	05/10/2021 ; 07h28	139
Point2		141
Point3		143
Point4	05/10/2021 ; 07h29	146
Point5		148
Point6		150
Point7	05/10/2021 ; 07h30	152
Point8		153
Point9		155
Point10	05/10/2021 ; 07h 31	158

Document technique DT5 : synoptique simplifié de l'installation



Document technique DT6 : synoptique de l'installation

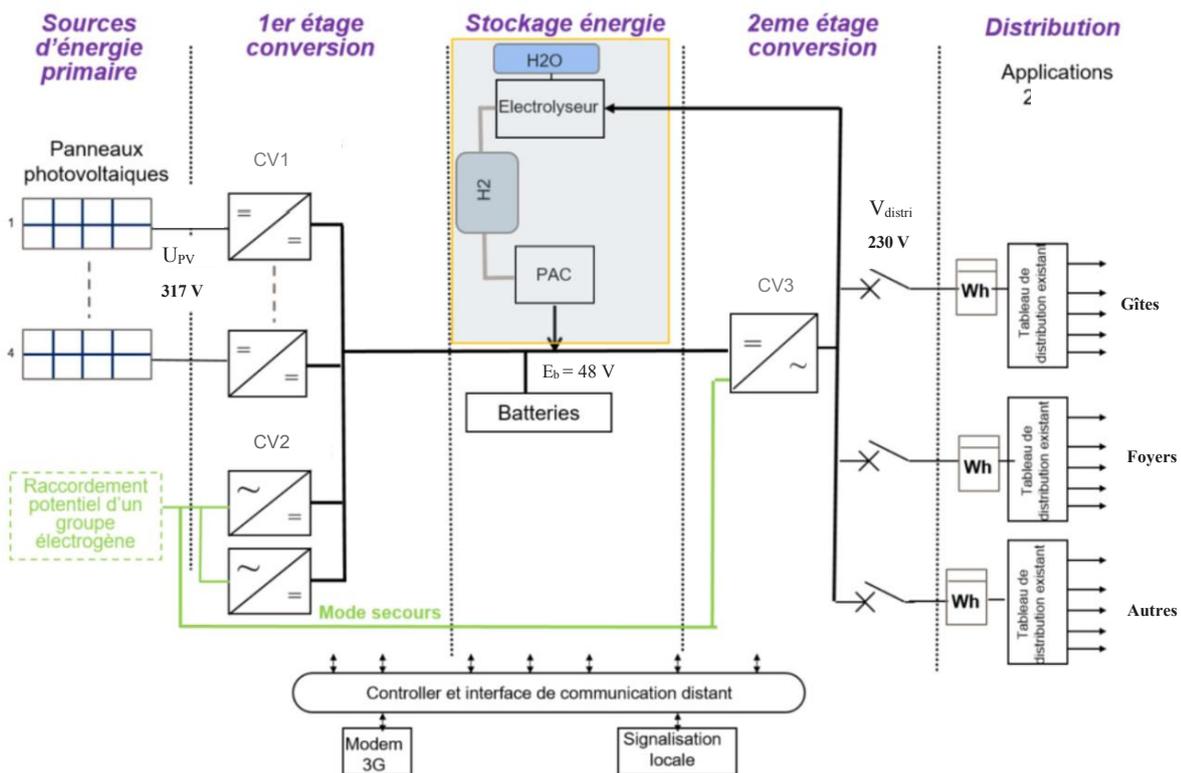
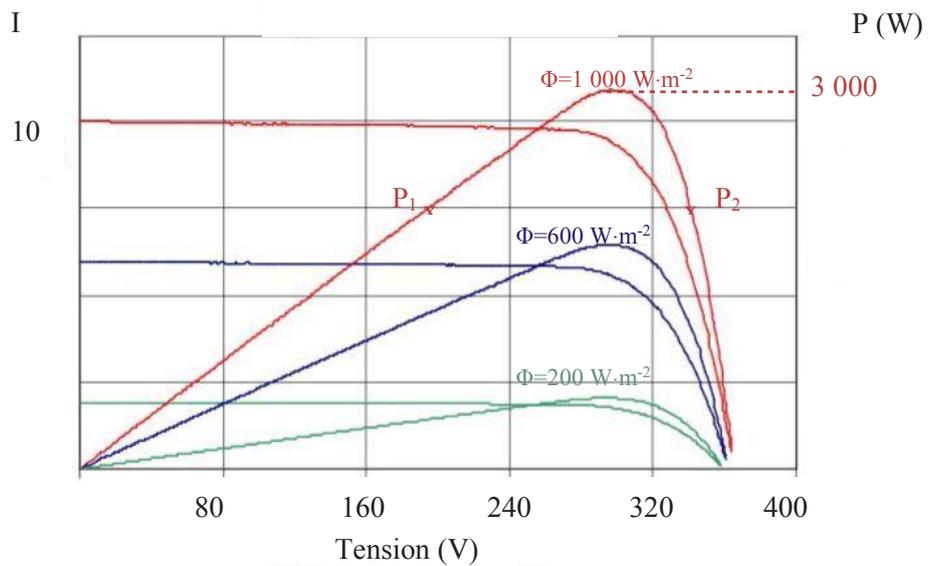
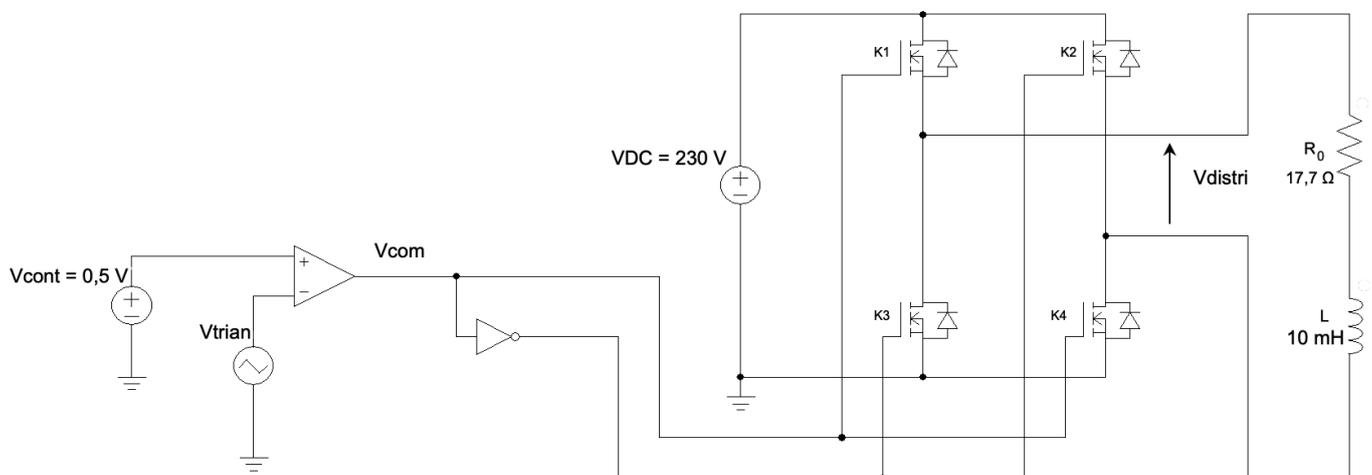


Figure 2 : Synoptique de l'installation (Source : EDF)

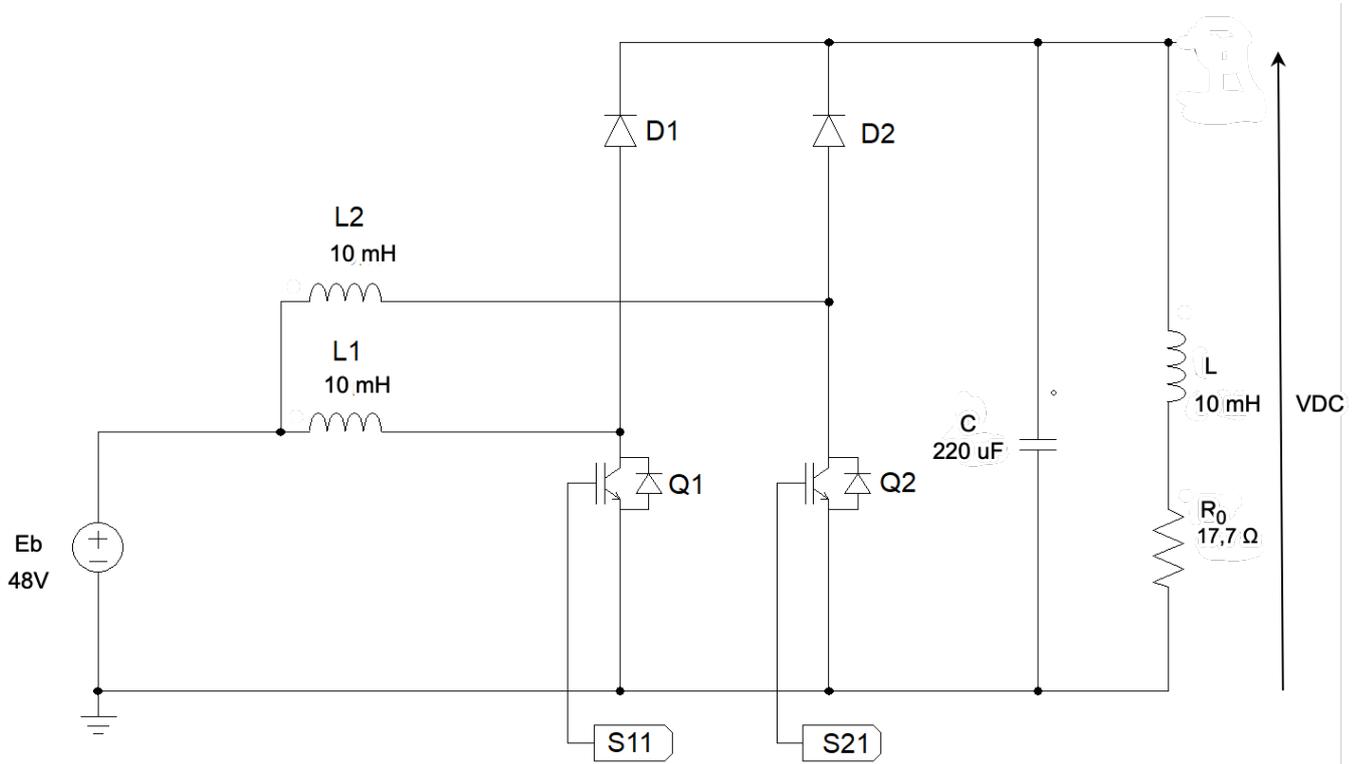
Document technique DT7 : caractéristiques du champ photovoltaïque



Document technique DT8 : schéma de CV3-2

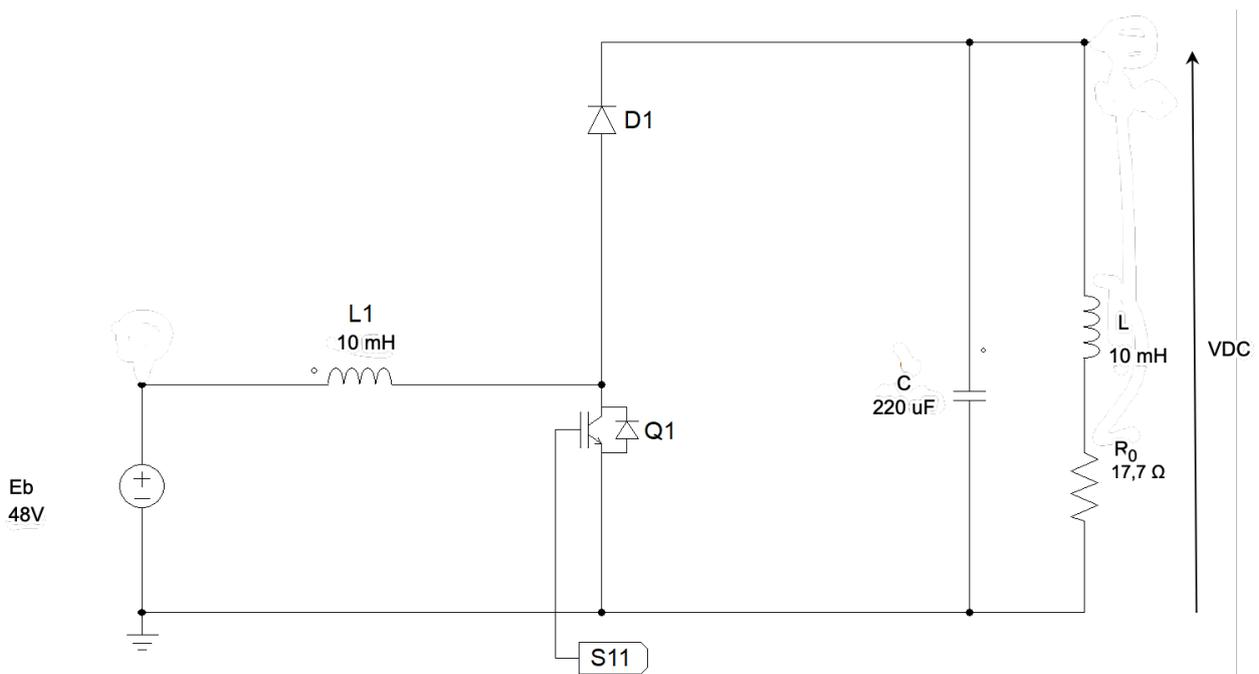


Document technique DT9 : schéma de CV3-1



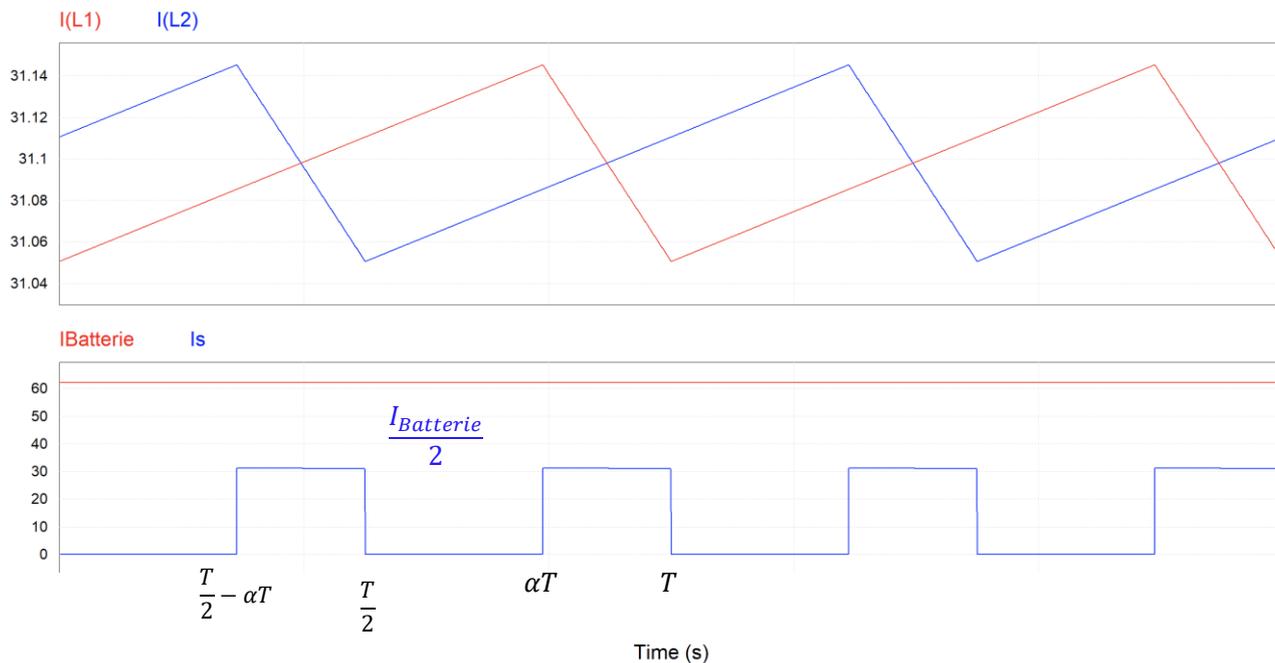
Les bornes S11 et S21 correspondent aux commandes de Q₁ et Q₂.

Document technique DT10 : schéma de CV3-1 simplifié

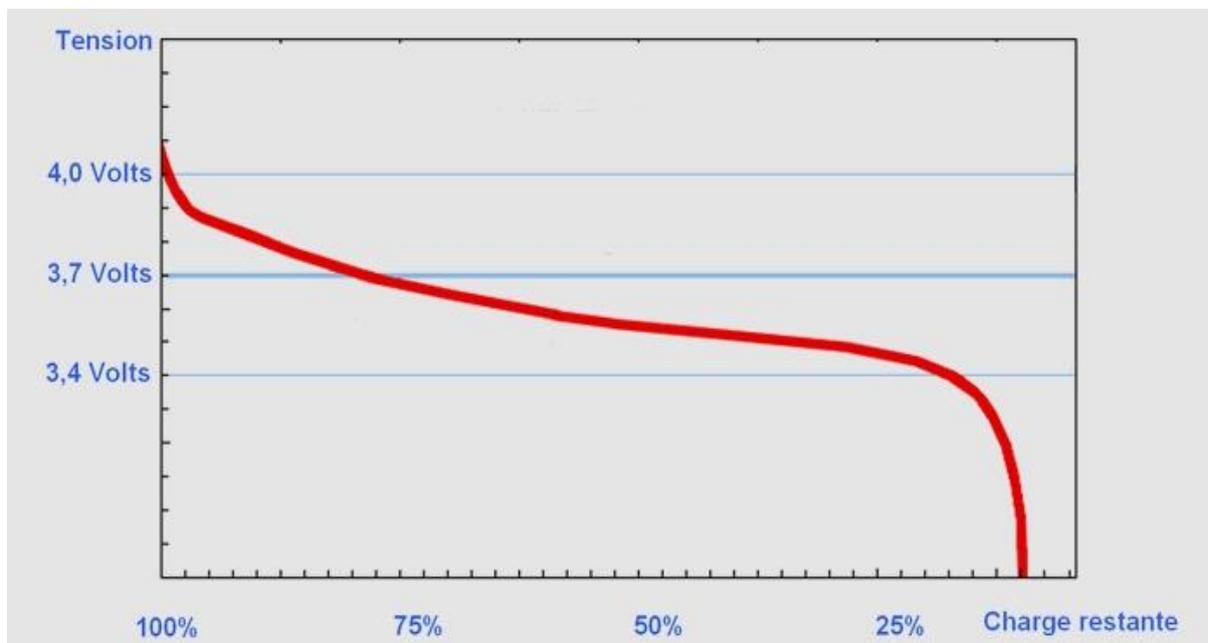


La borne S11 correspond à la commande de Q₁.

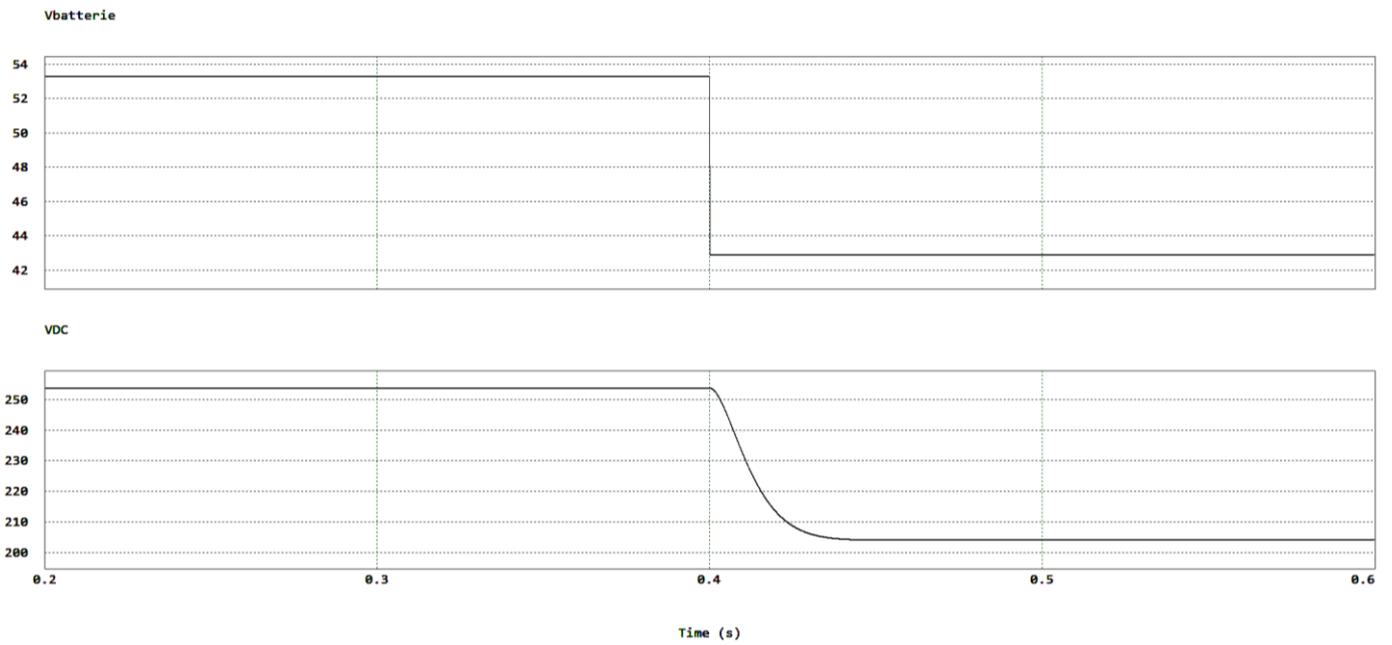
Document technique DT11 : allures des courants du convertisseur CV3-1



Document technique DT12 : évolution de la tension d'une cellule de la batterie



Document technique DT13 : allure de la tension en sortie du convertisseur CV3-1



NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE

Document Réponse DR1

Synthèse de la consommation annuelle d'un foyer		
Appareils	Nombre	Consommation totale annuelle (kWh)
Réfrigérateur	1	
Congélateur	1	
Four micro-onde	1	
Chargeur de smartphone	4	
Ordinateur de bureau	1	
Téléviseur LCD	1	
Lave-linge	1	
Fer à repasser	1	
Ampoule basse consommation	10	
Autocuiseur	1	
Consommation totale		

Synthèse de la consommation annuelle d'un gîte		
Appareils	Nombre	Consommation totale annuelle (kWh)
Réfrigérateur	2	
Congélateur	2	
Four micro-onde	1	
Chargeur de smartphone	10	
Ordinateur de bureau	1	
Téléviseur LCD	1	
Lave-linge	1	
Fer à repasser	1	
Ampoule basse consommation	20	
Autocuiseur	2	
Four	1	
Lave-vaisselle	1	
Sèche-linge	1	
Consommation totale		

Document Réponse DR2

Déclaration des variables

irrad : nombre réel.
 indice : nombre entier.
 Data : tableau.

Commentaires

Data[1,2] retourne la valeur contenue dans la cellule ligne 1 colonne 2 du tableau Data

Début

Lire le fichier .csv en excluant la ligne 1 et stocker les valeurs dans Data

irrad = 0

Pour indice allant de 0 à la longueur du tableau Data Faire

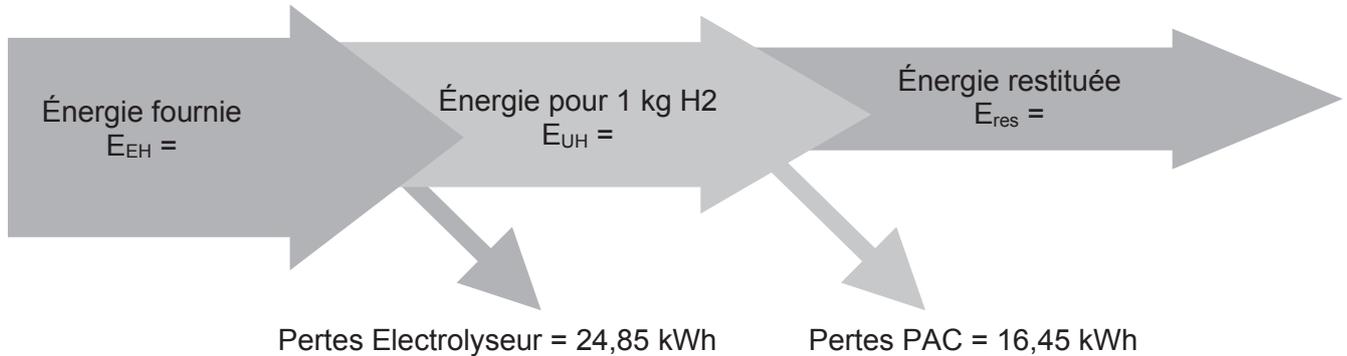
irrad = irrad + {Data[indice,1] *}

Fin Pour

Afficher la valeur de irrad

Fin

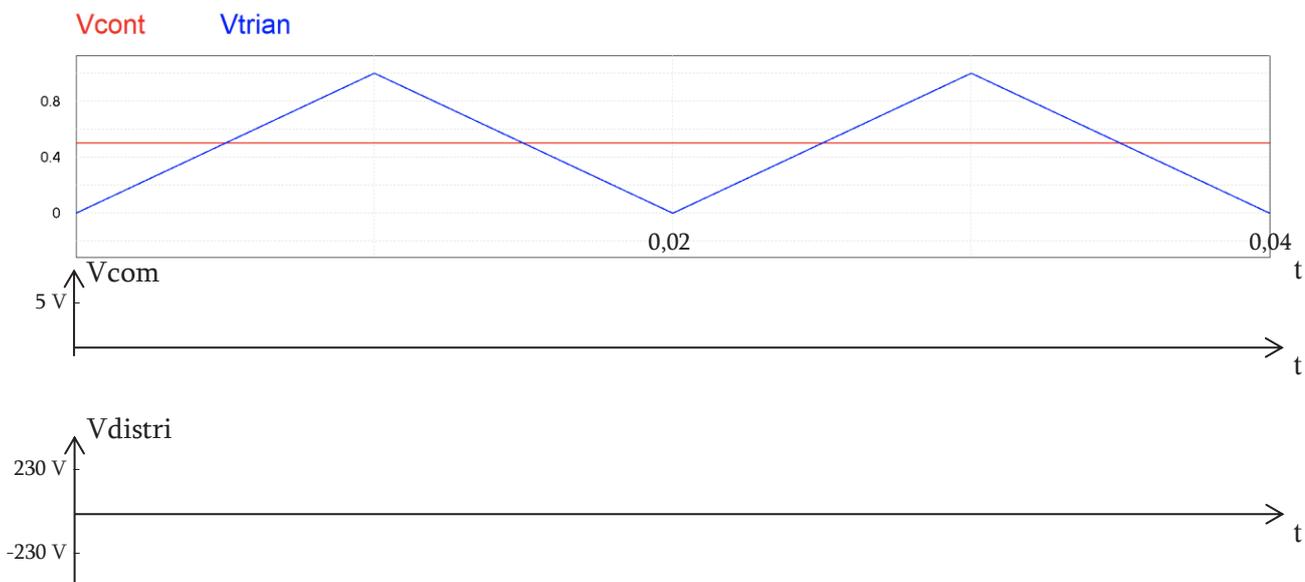
Document réponse DR3 - Bilan énergétique pour 1 kg dihydrogène



Document réponse DR4 - Noms et fonctions des convertisseurs d'énergie

Convertisseurs	Noms	Fonctions
CV1		
CV2		
CV3		

Document réponse DR5 - Allure des tensions de CV3-2

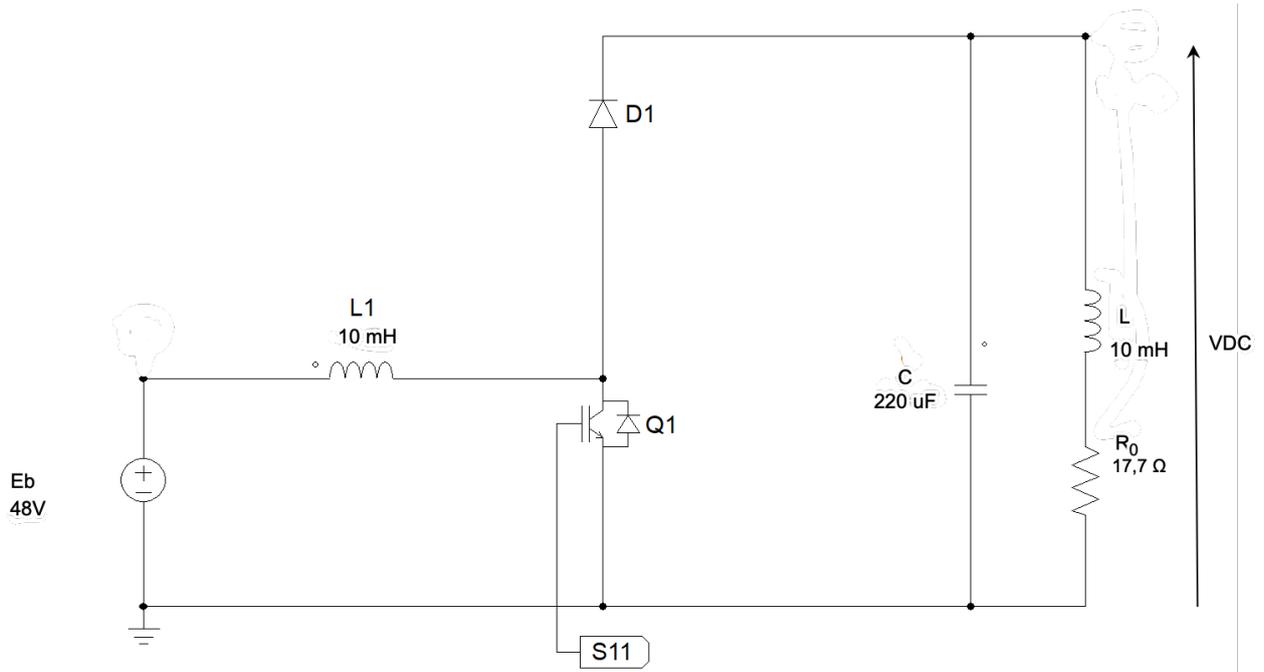


Document réponse DR6 - Commande des interrupteurs CV3-2

Q1	D1	Possible/Impossible	Explication
Bloqué	Bloquée		
Bloqué	Passante		
Passant	Bloquée		
Passant	Passante		

NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE

Document réponse DR7 - Structure de CV3-2



Document réponse DR8 - Allures des grandeurs de CV3-2

