

SESSION 2015

**CAPLP
CONCOURS EXTERNE
ET CAFEP**

**Section : GÉNIE ÉLECTRIQUE
Option : ÉLECTROTECHNIQUE ET ÉNERGIE**

ANALYSE D'UN PROBLÈME TECHNIQUE

Durée : 4 heures

Calculatrice électronique de poche – y compris calculatrice programmable, alphanumérique ou à écran graphique – à fonctionnement autonome, non imprimante, autorisée conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999.

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

Dans le cas où un(e) candidat(e) repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il (elle) le signale très lisiblement sur sa copie, propose la correction et poursuit l'épreuve en conséquence.

De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, il vous est demandé de la (ou les) mentionner explicitement.

NB : La copie que vous rendrez ne devra, conformément au principe d'anonymat, comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé comporte notamment la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de signer ou de l'identifier.

Philharmonie de Paris



Figure A1

Le sujet est composé d'un **seul dossier**, constitué d'une présentation, de quatre parties indépendantes (**à rendre**) et d'un ensemble d'annexes :

- Présentation,
- Partie A : étude de l'éclairage de la salle de répétition N°1,
- Partie B : la production d'énergie à partir de panneaux solaires,
- Partie C : la distribution de l'énergie électrique,
- Partie D : l'onduleur d'injection de l'énergie sur le réseau,
- Annexes.

Présentation



Figure A2

L'association Philharmonie de Paris se dote d'un équipement musical centré sur une grande salle de concert de 2 400 places dans le Parc de la Villette.

Principalement consacrée à l'accueil de grandes formations symphoniques, la Philharmonie de Paris présentera d'autres formes d'expression musicale, faisant notamment appel à la sonorisation, tels le jazz ou les musiques du monde.

Situé à l'entrée nord-est de la capitale dans un quartier en mutation, inscrit dans un parc à vocation culturelle, visible depuis la périphérie de Paris, cet équipement sera mis en valeur par une architecture innovante. Sur le plan acoustique, la salle de concert répondra aux normes internationales les plus exigeantes. Elle se démarquera des modèles strictement frontaux et privilégiera un enveloppement de la scène par le public afin de renforcer le sentiment d'intimité entre les interprètes et leur auditoire.

L'équipement occupera une superficie d'environ 20 000 m² utiles. Il comprendra, outre la grande salle de concert, ses foyers et ses espaces de répétition, des locaux administratifs pour plusieurs orchestres, un pôle éducatif, des espaces d'exposition, un restaurant, ainsi que les infrastructures nécessaires à la logistique et aux équipements techniques et un parc de stationnement.

Quelques points de ce projet sont remarquables :

- **Le confort visuel** : pour offrir un cadre agréable et accueillant tout en préservant l'environnement, l'ensemble du bâtiment conjuguera confort visuel et basse consommation d'énergie en optimisant les éclairages ambiants pour le besoin de chaque zone.
- **L'énergie** : le concept énergétique se fonde sur les principes suivants : réduire les besoins en énergie par des mesures constructives, avoir recours aux énergies renouvelables pour couvrir une grande part des besoins, utiliser les énergies conventionnelles pour les besoins résiduels.

Le bâtiment répond aux critères "haute qualité environnementale". Aussi, une surface de cellules photovoltaïques est intégrée à l'enveloppe du bâtiment.

Partie A : Étude de l'éclairage de la salle de répétition N°1

Introduction

Outre le fait de disposer d'une salle de concert très modulable (figure A1) pour s'adapter aux événements, la Philharmonie de Paris intègre plusieurs salles de répétition.

Les espaces de répétition de la Philharmonie de Paris visent à répondre à des demandes simultanées et fréquentes des formations, résidentes comme invitées.

La grande salle de répétition n° 1

Elle dispose d'un plateau de dimensions identiques à celles de la scène pour la partie orchestre, auquel s'ajoutent des gradins de chœur et des gradins accueillant du public (200 personnes) pour certaines répétitions.

Une galerie haute – un balcon – permet à des musiciens, ou à des élèves de conservatoire, d'assister aux répétitions dans de bonnes conditions d'écoute, mais aussi de discrétion.

Le volume de cette salle de répétition et de concert, sa géométrie et ses matériaux sont choisis pour offrir de très bonnes conditions acoustiques.



Figure A3

Zone	puissance (W/m ²)	Eclairage (lx)
Salle de concert	12	150
Salle de conférence	12	150
Salle de répétition 01	12	150 (moyen) / 400 (max sur la scène)
Salle de répétition 02	12	150 (moyen) / 400(max sur la scène)
Salles de répétition autres	12	300

Un complément d'information est fourni dans le document ANNEXE 2.

Éclairage et performance énergétique

On s'intéresse à l'éclairage de la salle de répétition de la Philharmonie.

La Philharmonie intègre des contraintes de construction qui lui permettent d'être qualifiée HQE et BBC.

A1) Que signifie HQE et BBC ?

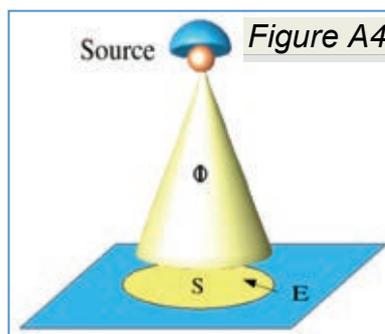
A2) D'après le document ANNEXE 1, la réglementation thermique 2012 est-elle applicable au bâtiment de la Philharmonie ? En préciser la raison.

OUI NON

A3) En quoi l'étude de l'éclairage des différentes zones d'un bâtiment contribue-t-elle à atteindre les objectifs de performances énergétiques ?

Éclairagisme

L'étude de l'éclairage de la salle de répétition N°1 fait appel à des notions liées à la photométrie.



A4) Remplir le tableau suivant :

	Unité	Symbole
Éclairement (E)		
Flux lumineux (Φ)		
Intensité lumineuse (I)		

A5) Donner la valeur du niveau d'éclairage théorique (Eth) moyen souhaité, pour la salle de répétition n°1.

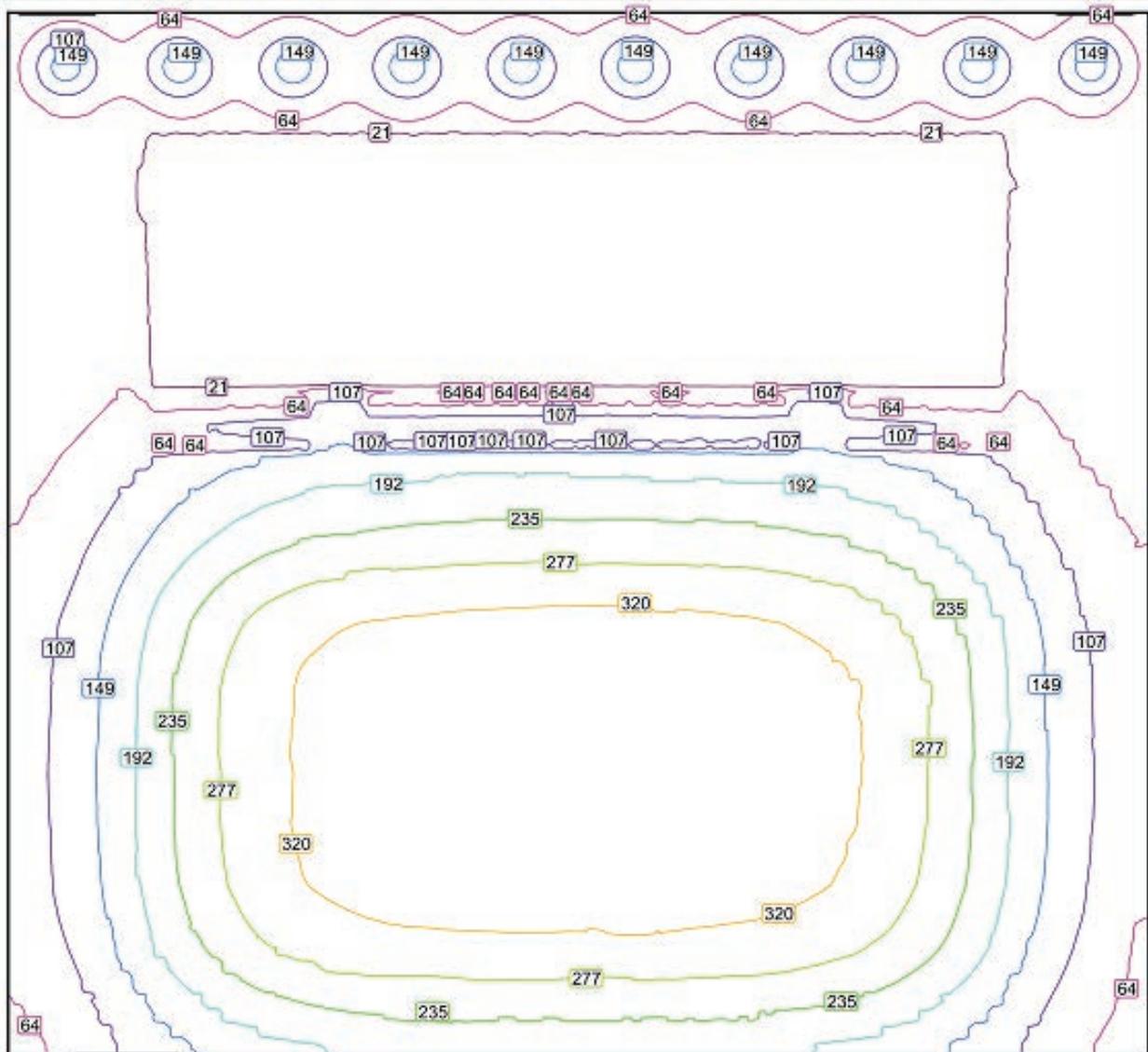
Les calculs de cet avant projet d'éclairage sont réalisés à l'aide d'un logiciel spécialisé.

Résultats généraux

Type de résultat	Moyenne	Min	Max	Points (pertinents de ce nombre)
Eclairage salle entière (lx)	153	0.09	358	(1024x1024)
Eclairage de la scène (lx)	285	145	358	(128x64)

Les points pertinents sont ceux situés à l'intérieur des surfaces respectives et qui ne sont pas cachés par des meubles ou d'autres éléments. Les résultats récapitulatifs sont basés exclusivement sur ces points, puisque tout autre point fausserait partiellement les résultats de façon considérable.

Bilan de la salle de répétition : flux total : $\Phi_t = 152310 \text{ lm}$, puissance totale : $P_t = 2069 \text{ W}$



21 64 107 149 192 235 277 320 lx

Figure A5 : Bilan de l'étude

A6) Quelle est la valeur de l'éclairage moyen général E_m dans la salle de répétition et sur la scène E_s (voir figure A3 pour ces espaces) ?

On rappelle la relation permettant de calculer le flux lumineux (en lumen, lm) :

$$\Phi = \frac{E \times S \times d}{\eta_i \cdot U_i + \eta_s \cdot U_s}$$

Avec :

- E : éclairage en lux (lx),
- S : surface éclairée (m²),
- $U_{\{i,s\}}$: coefficients d'utilité (on prendra $U_j = 68\%$),
- d : facteur dépréciation (on prendra $d = 1$),
- $\eta_{\{i,s\}}$: rendement du luminaire (i : partie inférieure, s : partie supérieure, voir annexe 2).

A7) Donner l'équation du flux Φ_s simplifiée pour notre étude (justifier).

A8) Estimer alors la valeur du flux Φ_s reçu par la scène seule.

A9) Combien de tubes fluorescents de 54W faut-il installer ?

Par définition, la luminance (L) est le quotient de l'intensité lumineuse (I) d'une source dans une direction, par la surface apparente (S) vue dans cette même direction : $L = \frac{I}{S}$ (en cd/m^2).

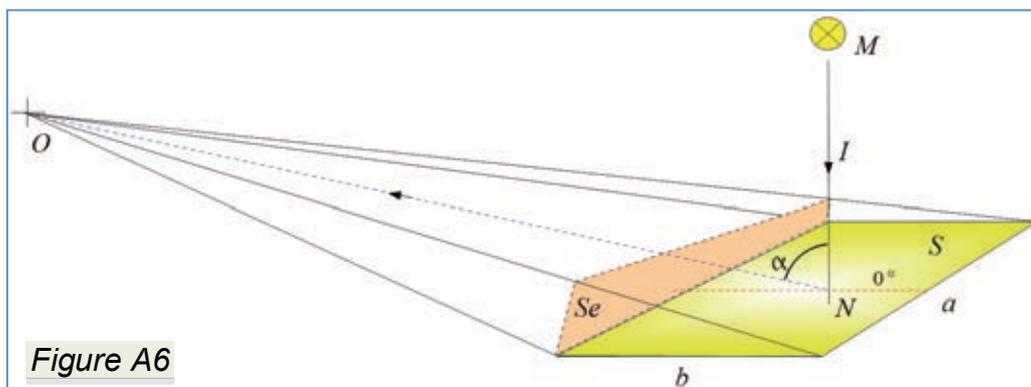
On considère que l'intégralité de l'intensité I est réfléchie.

O est le point d'observation.

On appelle S_e la surface normale à la direction d'observation.

On donne l'expression de la luminance (L_e), pour un spectateur placé au point O et observant

la surface S :
$$L_e = \frac{I}{S_e} = \frac{I}{a \times b \times \cos \alpha}$$



L'intensité lumineuse est évaluée à $I = 8621 \text{ Cd}$ dans l'axe d'une direction normale à la surface S (suivant l'axe MN).

A10) Calculer alors la luminance L_e en fonction des éléments de la salle de répétition pour : $I = 8621 \text{ cd}$ et $\alpha = 70^\circ$.

A11) Quelle serait l'incidence d'une valeur trop élevée de la luminance de la scène de la salle de répétition ? Préciser les facteurs qui influencent cette grandeur.

Conséquence d'une luminance trop élevée	La luminance dépend de quels facteurs

On donne l'expression de la luminance pour l'axe MN normal à la surface S : $L = \frac{\rho \times E}{\pi}$

A12) Calculer la valeur du coefficient de réflexion ρ pour la surface S de la scène.

Le diagramme de Kruithof illustré à la figure ci-après permet de vérifier que l'éclairage d'un local offre un confort visuel.

La zone 1 correspond à un éclairage élevé et des températures des couleurs froides ;

La zone 2 correspond à la zone de confort optimal ;

La zone 3 correspond à un éclairage faible et des températures des couleurs chaudes.

Les zones 1 & 3 sont synonymes d'inconforts visuels (ambiance trop chaude et trop froide).

A13) Placer le point A correspondant à l'ambiance globale de notre salle de répétition en fonction des données et/ou résultats. Préciser les coordonnées de A et commenter.

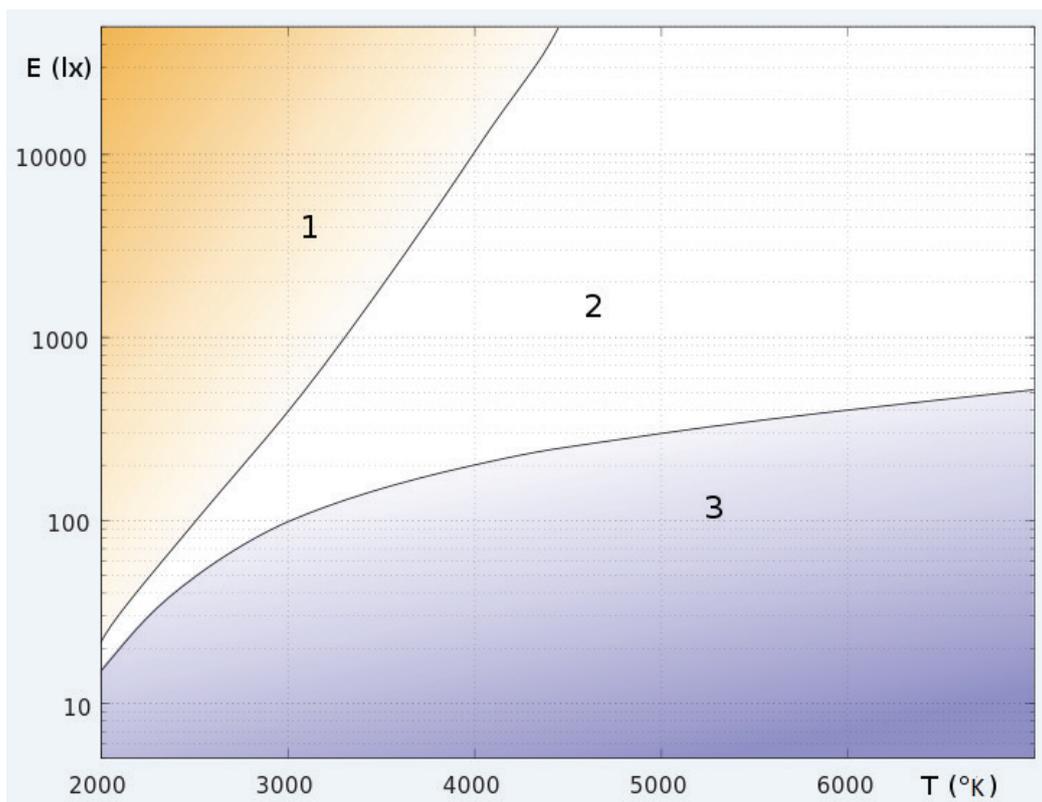


Figure A7 : Diagramme de Kruithof

Commenter les résultats :

Énergie

A14) Calculer l'efficacité lumineuse f_e de la salle de répétition ($f_e = \frac{\Phi_t}{P_t}$) en lm/W en vous basant sur les résultats généraux obtenus.

Pour une exploitation de la salle de répétition 1 de 7 heures / jour, 320 jours / an.

A15) Calculer la consommation d'énergie annuelle par mètre carré C_{se} (kWh/m²/an), pour la partie éclairage de la salle de répétition.

Les bâtiments répondant à la réglementation RT2012, sont limités à une Consommation d'Énergie Primaire (C_{ep}) de : $C_{ep} = 50$ kWh/m²/an. Même si certains bâtiments ne sont pas directement concernés, il est préférable de s'approcher de cette norme pour être plus performant énergétiquement.

A16) Si l'on souhaitait se conformer à la réglementation RT2012, quelle devrait-être la part des consommations autres que la lumière : C_a (chauffage etc.) en kWh/m²/an pour cette salle de répétition ?

Partie B : La production d'énergie à partir de panneaux solaires

Introduction

Des cellules photovoltaïques équiperont le bâtiment de la Philharmonie de Paris. La solution retenue doit être totalement intégrée au bâti. Ces cellules seront utilisées pour une revente d'énergie à l'ERDF mais au niveau architectural, l'esthétique reste la première contrainte.

Installation Photovoltaïque

Le champ des panneaux photovoltaïques, ou champ PV, comporte 420 panneaux rectangulaires, identiques, de puissance crête unitaire égale à 140 Wc (watt crête). Compte tenu de la forme de la toiture et de diverses contraintes architecturales, ces 420 panneaux sont répartis en 9 sous-champs de puissances différentes. Chaque sous-champ possède :

- Une orientation donnée ou azimuth (angle d'orientation par rapport au sud)
- Une inclinaison donnée (angle par rapport à l'horizontale)

Il est connecté à son propre onduleur à « poursuite du point de puissance maximale » (MPPT) et comporte fusibles, parafoudres et interrupteurs sectionneurs.

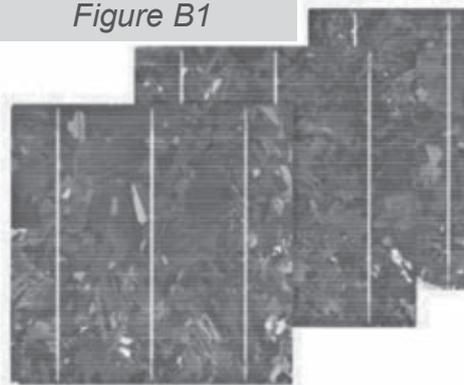
Le schéma de l'ANNEXE 3 présente le sous-champ PV de la zone S4.

Panneaux photovoltaïques

Pour raison d'esthétique, l'architecte a choisi des panneaux photovoltaïques sur mesure chez le fabricant allemand Sunways. En effet, celui-ci propose des variantes de teintes d'argent, d'or, de bronze et d'émeraude. L'argent a été retenu car il offre une grande homogénéité de couleur et rend quasi indétectable la présence de panneaux photovoltaïques.

Chaque panneau est construit à partir d'un assemblage de **50 cellules CH 50 5601**, de taille 0.156 x 0.156 m. Elles sont connectées en série et le panneau présente une **surface hors tout S = 1,5 m²**.

Figure B1



Solar Cells – Silver

Current class as per I (V _{FIX})	Efficiency [%]	Output at V _{FIX} ⁽¹⁾ [Wp]	I (V _{FIX} = 500 mV) [A]	Fill factor [%]	V _{OC} [mV]	I _{SC} [A]
CH 50 4801	9,9	2,40	4,80	74,7	594	5,66
CH 50 5101	10,5	2,55	5,10	76,0	595	5,72
CH 50 5201	10,7	2,60	5,20	76,5	596	5,77
CH 50 5301	10,9	2,65	5,30	76,9	597	5,81
CH 50 5401	11,1	2,70	5,40	77,2	598	5,86
CH 50 5501	11,3	2,75	5,50	77,3	600	5,92
CH 50 5601	11,5	2,80	5,60	77,4	602	6,00
CH 50 5701	11,7	2,85	5,70	77,4	604	6,08

Les caractéristiques des cellules sont données pour les conditions d'essai normalisées :

Irradiance : 1000 W/m², Température : 20°C, Coefficient d'atmosphère : AM1.5

Définition des grandeurs électriques :

V_{FIX} : tension de test, assimilable à la tension au point de puissance maximale, notée V_{MPP},

V_{OC} : tension de sortie à vide,

I_{SC} : courant de court-circuit,

Output at V_{FIX} : Puissance crête de la cellule, notée P_C.

B1) Vérifier la puissance crête d'un panneau puis calculer le rendement global de celui ci dans les conditions d'essai normalisées. Le panneau présente une surface hors tout $S = 1,5 \text{ m}^2$.

$P_C =$

rendement =

B2) Calculer en valeur relative (%) la perte de rendement par rapport à celui d'une cellule.

Perte de rendement =

Influence de la température.

Soumis à une température différente de 20°C , les caractéristiques d'une cellule évoluent :

Solar cells temperature coefficients :

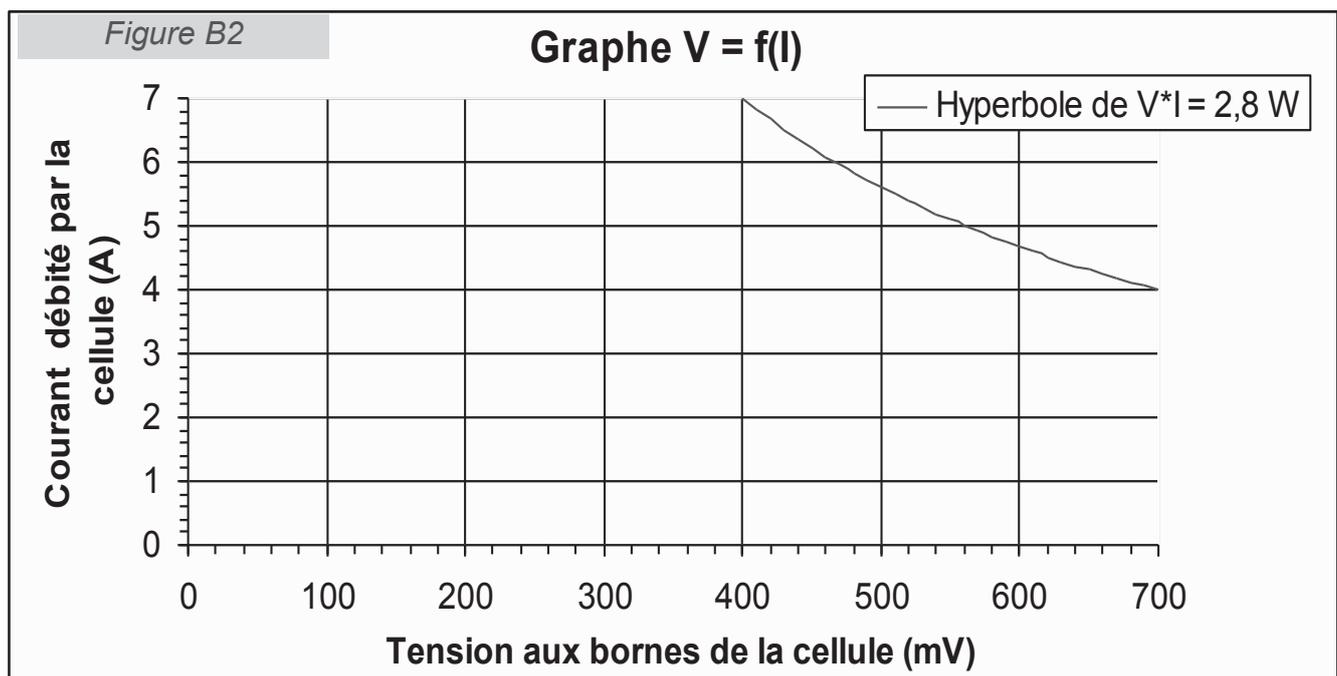
- *Output pic power : $-0,43 \text{ \% / } ^\circ\text{C}$,*
- *Open-circuit voltage : $-0,36 \text{ \% / } ^\circ\text{C}$,*
- *Short-circuit current : $0,06 \text{ \% / } ^\circ\text{C}$.*

B3) Calculer les puissances crêtes du panneau pour des températures $\theta_1 = 0^\circ\text{C}$ puis $\theta_2 = 50^\circ\text{C}$? (Précision demandée : 3 chiffres significatifs) ; les autres conditions d'essai normalisées restant inchangées.

$P_{C1} =$

$P_{C2} =$

B4) Tracer sur le repère ci-dessous, figure B2, et en utilisant les points particuliers, l'allure de la caractéristique $V=f(I)$ d'une cellule pour $\theta_N = 20^\circ\text{C}$ puis $\theta_2 = 50^\circ\text{C}$; les autres conditions d'essai normalisées restant inchangées.



Influence du « mismatch »

Les cellules d'un même panneau ne sont pas exactement identiques, il y a dispersion de leurs caractéristiques (« mismatch »). Pour l'étude des conséquences de ce « mismatch », retenons le modèle simplifié présenté sur la figure B3 : une cellule est équivalente à un générateur de courant parfait I_{PH} , en parallèle avec une résistance et une diode. La diode idéalisée présente la caractéristique ci-dessous. I_{PH} dépend de l'irradiance.

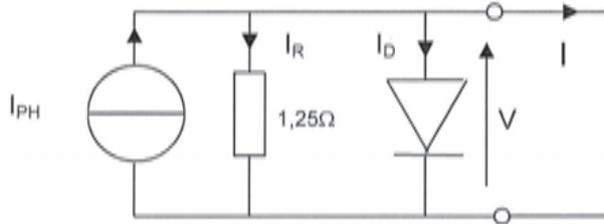
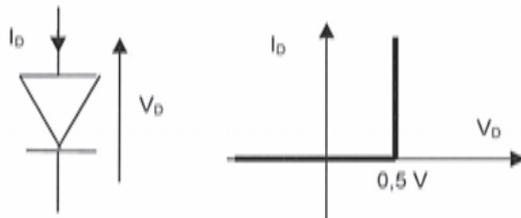
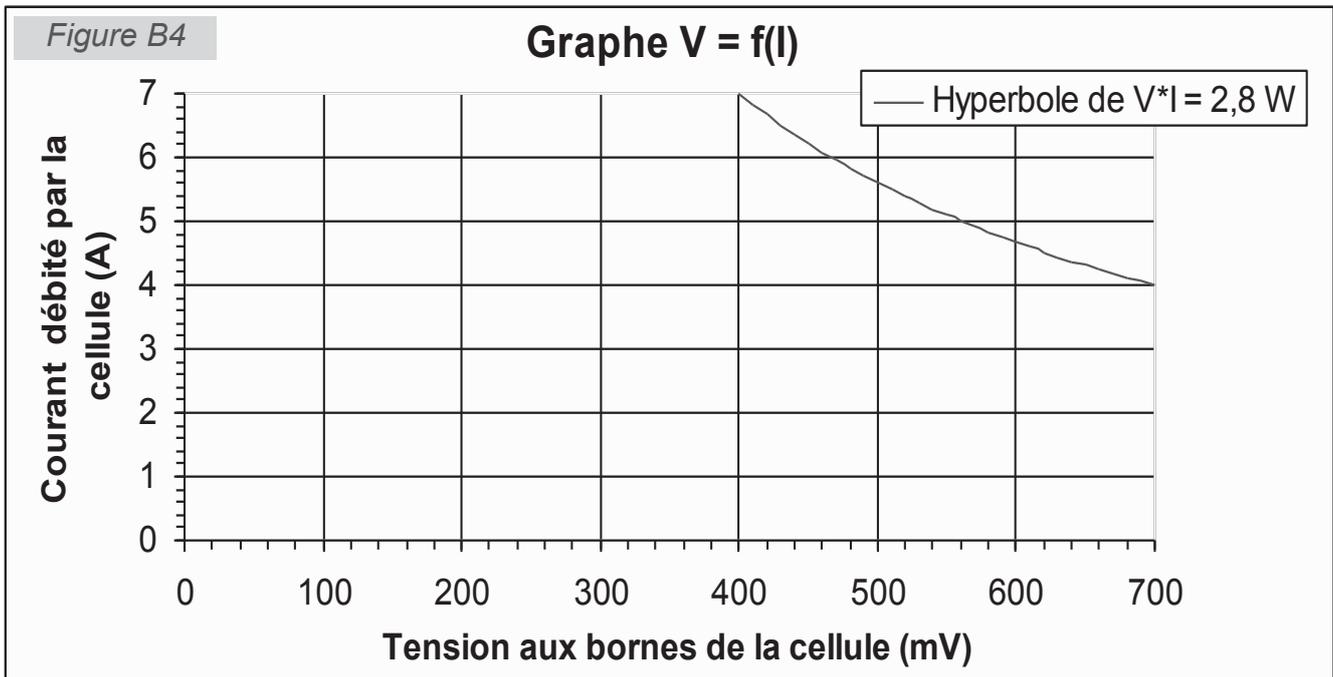


Figure B3

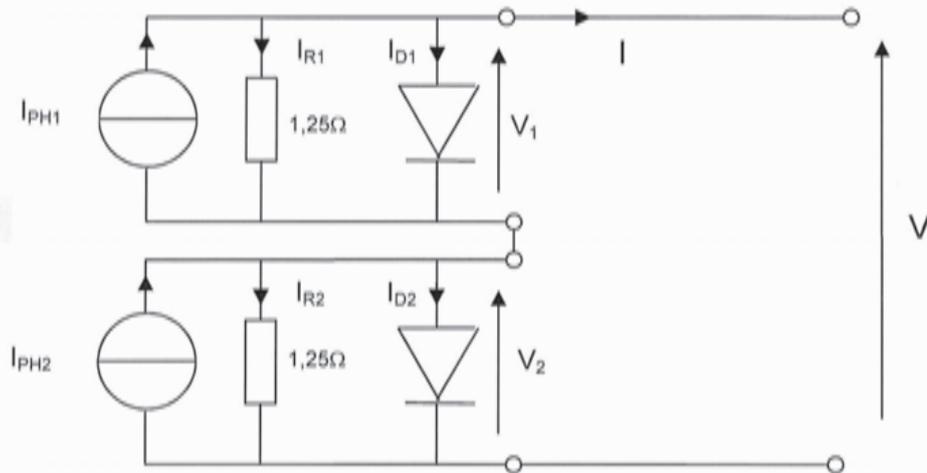


B5) Tracer sur le repère ci-dessous, figure B4, sous forme de 2 droites, la caractéristique externe $V = f(I)$ de la cellule idéalisée.



Considérons deux cellules identiques en série, voir figure B5. Elles fonctionnent au point de puissance maximum (MPP, point d'intersection des deux droites sur le graphe qui vient d'être tracé).

Figure B5



B6) Compléter le tableau ci-dessous avec les valeurs numériques manquantes en considérant le fonctionnement au point de puissance maximale (MPP).

I_{PH1} (A)	I_{PH2} (A)	I_{R1} (A)	I_{R2} (A)	I_{D1} (A)	I_{D2} (A)	P_1 (W)	P_2 (W)	V (V)	I (A)
6	6	0.4		0					

Considérons maintenant une différence sur I_{PH} , liée à la dispersion des caractéristiques ou à un niveau de salissure différent.

B7) Compléter le tableau ci-dessous avec les valeurs numériques manquantes. L'ensemble des panneaux fonctionne toujours au point de puissance maximale.

I_{PH1} (A)	I_{PH2} (A)	I_{R1} (A)	I_{R2} (A)	I_{D1} (A)	I_{D2} (A)	P_1 (W)	P_2 (W)	V (V)	I (A)
6	5.7								

B8) Il y a 50 cellules en série par panneau. Seule une cellule est touchée par cette réduction du courant I_{PH} . Calculer la perte de puissance engendrée en sortie du panneau, puis conclure.

$$\Delta_{PC} =$$

Conclusion :

Philharmonie de Paris – Simulation de la production photovoltaïque effectuée à l'aide du logiciel PVsyst par le bureau d'étude de l'entreprise INEO GDF SUEZ

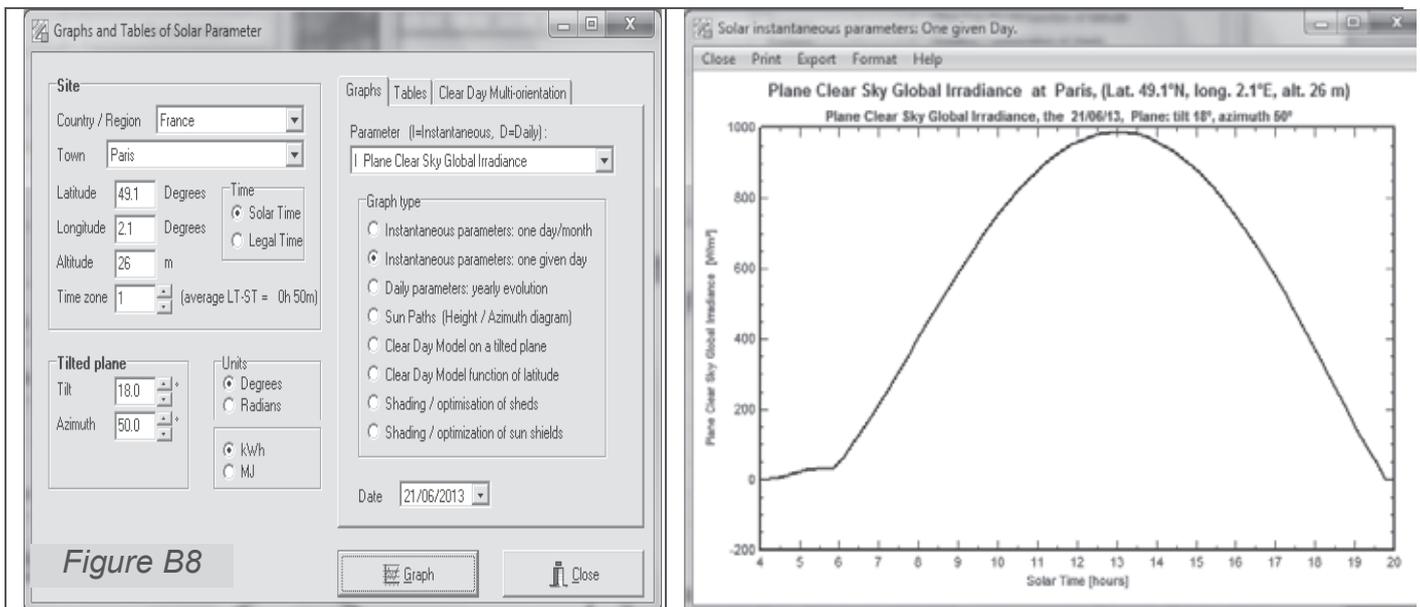
Sous-champ	Nb de modules PVsyst	Nb de modules réel	Production annuelle PVsyst	Production annuelle réelle
E1	90	88	12 040 kWh/an	11 772 kWh/an
E2	20	20	2 584 kWh/an	2 584 kWh/an
E3	12	12	1 451 kWh/an	1 451 kWh/an
E4	16	16	2 009 kWh/an	2 009 kWh/an
S1	45	45	5 333 kWh/an	5 333 kWh/an
S2	11	11	1 267 kWh/an	1 267 kWh/an
S3	39	39	4 832 kWh/an	4 832 kWh/an
S4	100	100	13 240 kWh/an	13 240 kWh/an
S5	90	89	12 280 kWh/an	12 144 kWh/an
TOTAL	423	420	55 036 kWh/an	54 632 kWh/an

Figure B7

Puissance et énergie journalière

Les données météo exploitées par le logiciel PVsyst nous donnent l'irradiance instantanée par temps clair sur le site de la Philharmonie de Paris (figure B8).

Le sous-champ PV de la zone S4 présente un azimut de 50° et une inclinaison de 18°. La simulation a été faite pour le jour le plus long de l'année.

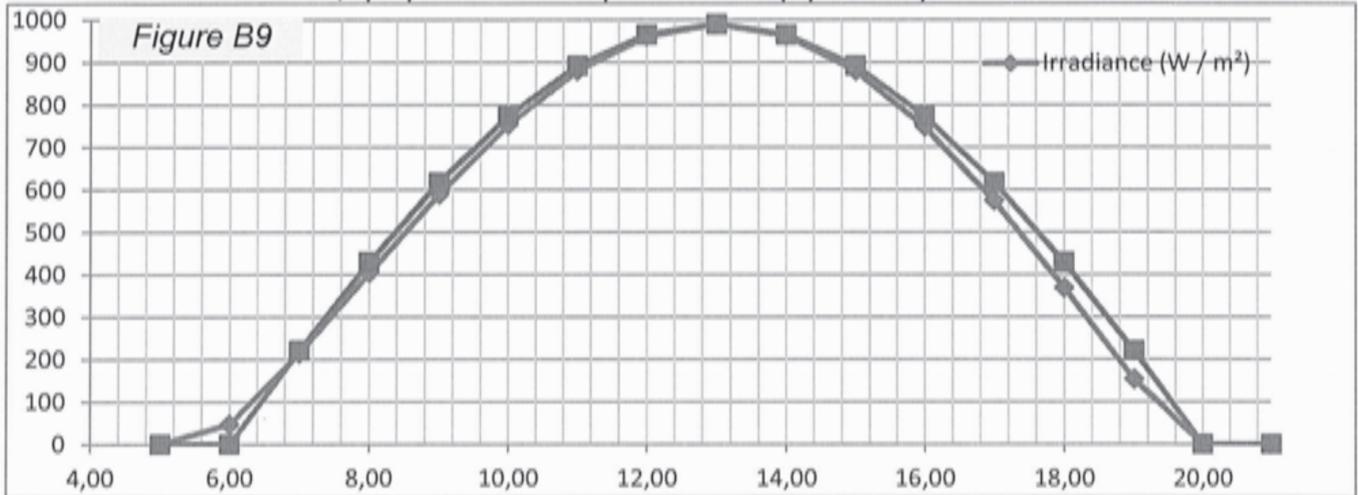


Cette caractéristique d'irradiance peut être modélisée par une fonction mathématique simplifiée :

$$I(t) = I_M \cdot \sin\left(\pi \frac{t - 6}{T_J}\right)$$

T_J est la durée du jour
 $I_M = 990 \text{ W/m}^2$ est l'irradiance maximale
 t est le temps en heures (heure solaire).

Sur la figure B9, le tracé sous Excel de cette fonction (modèle) est superposé au tracé du résultat de la simulation, qui prend en compte beaucoup plus de paramètres.



B10) Expliquer pourquoi, l'irradiance maximale n'est pas observée à midi (heure solaire).

B11) Exprimer l'irradiation solaire journalière W_{sol} qui atteint le panneau en fonction des grandeurs I_M et T_J . La calculer en kWh.

$W_{sol}_{21/6} =$

B12) Calculer cette irradiation à la date du 21 décembre, jour pour lequel $I_M = 425 \text{ W/m}^2$ et $T_J = 7 \text{ h } 30 \text{ mn}$, puis en déduire l'irradiation annuelle.

$W_{sol}_{21/12} =$

$W_{sol}_{annuelle} =$

Onduleur

Comme constaté sur le schéma en ANNEXE 3, le sous-champ PV de la zone S4 est connecté à un onduleur SMA Tripower 15000 TL, conçu pour les réseaux triphasés 3x400 V, 50 Hz et dont les caractéristiques sont données en ANNEXE 5.

B13) Il s'agit de justifier le choix de ce modèle d'onduleur. En se basant sur la puissance nominale des panneaux et à l'aide des annexes 3 et 5, remplir le tableau ci-dessous qui résume les trois principaux critères de choix. On précise que cet onduleur possède deux entrées DC différentes (input A, input B).

		critère 1	critère 2	critère 3
	Définition	Puissance maximale d'entrée	Intervalle de la tension d'entrée pour la poursuite du MPP (max power point)	Courant maximum d'entrée
Input A	Caractéristique du sous-champ PV			
	Caractéristique de l'onduleur			
Input B	Caractéristique du sous-champ PV			
	Caractéristique de l'onduleur			
	Remarques			

Fonctionnement de l'onduleur.

Compte tenu de l'importance de cette étude, celle-ci a été reportée en partie D.

Protections et câbles

L'ANNEXE 6 est un extrait de la norme UTE C 15-712, relative aux installations photovoltaïques, qui permet de dimensionner les protections et câbles.

I_{scSTC} est le courant de court circuit d'un panneau, ou d'une chaîne, ou d'un groupe PV en conditions d'essai normalisées.

B14) Préciser la valeur de I_{scSTC} de chaque chaîne PV de la zone S4. Choisir, en le justifiant selon la norme, le calibre des fusibles du coffret DC1 de la zone S4.

B15) Calculer, selon la norme, le courant admissible I_{z1} dans le câble C_1 , de longueur L_1 , reliant une chaîne de panneaux au coffret DC1, puis le courant admissible I_{z2} dans le câble principal C_2 , de longueur L_2 , reliant le groupe de 4 chaînes PV, du coffret DC1 au coffret DC2.

Compte tenu du mode de pose des câbles et de la température sous toiture, un coefficient de correction est appliqué sur les courants admissibles. Les caractéristiques des câbles sont données sur l'ANNEXE 4, par le logiciel de dimensionnement PVSyst.

B16) Calculer la chute de tension ΔV entre les panneaux et le coffret DC2. Les câbles sont en cuivre et à double isolation. On donne la résistivité du cuivre à chaud (70°C): $\rho = 1,9 \cdot 10^{-8} \Omega.m$. Cette chute de tension est-elle compatible avec la norme.

$\Delta V =$

Compatibilité avec la norme :

Partie C : La distribution de l'énergie électrique

Introduction

Le schéma unifilaire de la distribution d'énergie principale (hors parkings) est fourni sur l'ANNEXE 7. Elle utilise trois transformateurs de 1250 kVA et un groupe électrogène de 1460 kVA. Ce dernier ne fonctionne qu'en cas de mise hors service des trois transformateurs (coupure de la haute tension). La finalité de cette étude est de vérifier la puissance disponible en cas de défaut ainsi que la chute de tension due à un transformateur.

Puissances disponibles

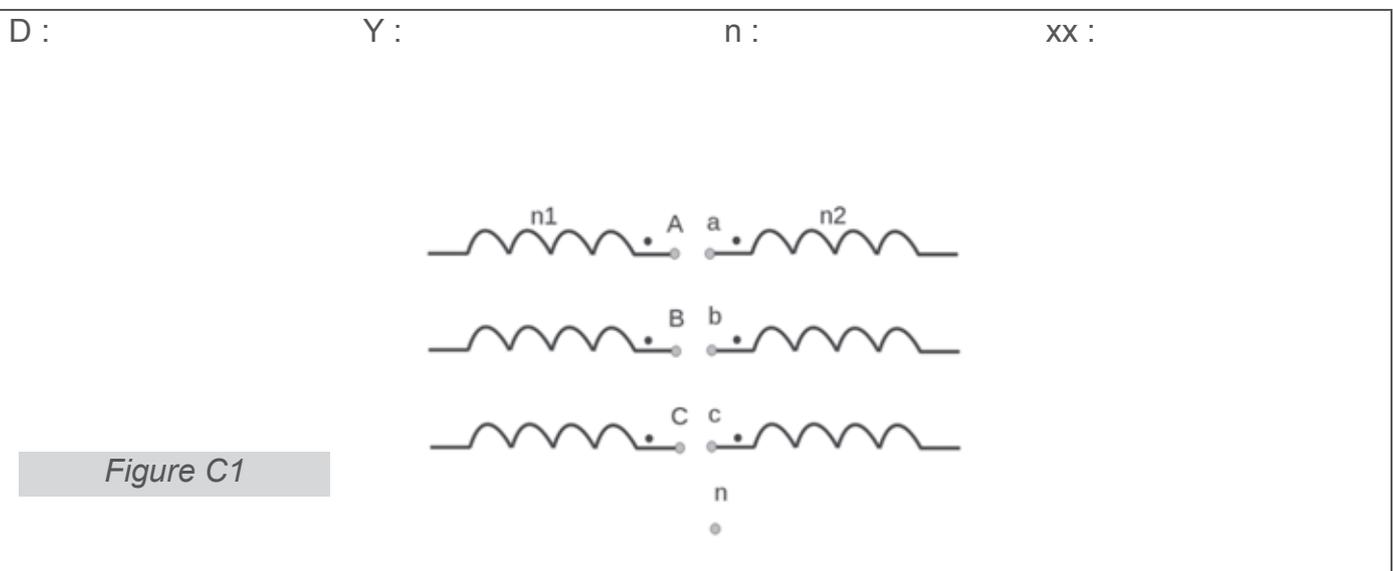
C1) Compléter le tableau ci-dessous en indiquant pour chaque scénario, la puissance (en kVA) disponible sur chaque TGBT. En cas de puissance partagée, on indiquera la puissance maximale.

	TR1, TR2 et TR3 en service (fonct. Normal)	TR1 ou TR2 est indisponible ou en défaut	TR3 est indisponible ou en défaut	Coupure de la haute tension
Sur le jeu de barres du TGBT NR (normal / Remplacement)				
Sur le jeu de barres du TGBT scénique				
Sur le jeu de barre du TGBT S (sécurité)				

Transformateur TR2

La suite du questionnement porte sur le transformateur TR2 dont la documentation est fournie en ANNEXE 8.

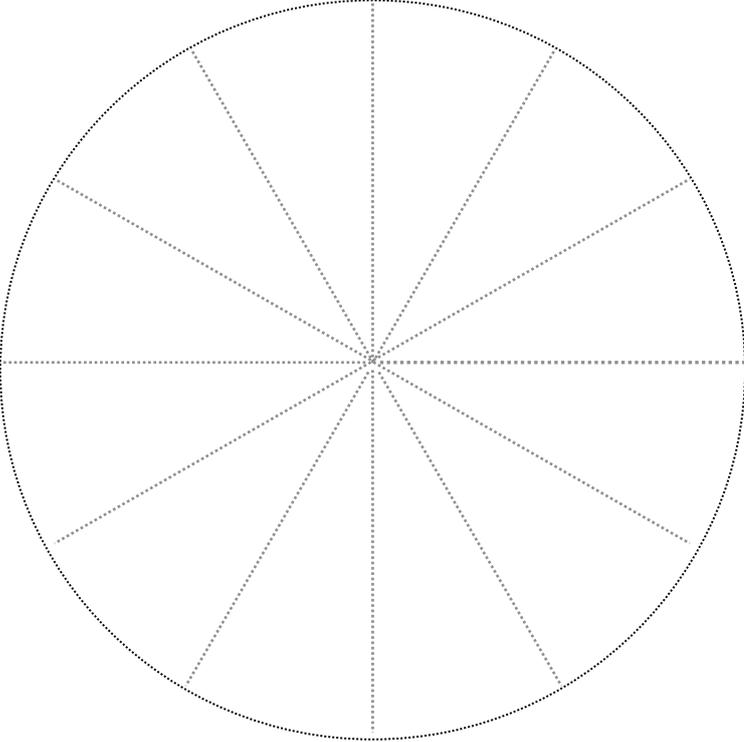
C2) Préciser ce que signifie Dyn xx puis compléter le schéma de la figure C1, en y faisant apparaître le couplage ainsi que le fléchage des différentes tensions par enroulement.



C3) Établir l'expression du rapport de transformation m (tension composée secondaire / tension composée primaire) en fonction des nombres de spires n_2 et n_1 .

C4) Compléter la construction de Fresnel de la figure C2, correspondant au couplage du transformateur TR2, en y reportant les tensions simples et composées présentes au secondaire. En déduire l'indice horaire du transformateur.

Figure C2



Indice horaire :

C5) Sur l'ANNEXE 8, on remarque que les transformateurs ont une tension de court circuit de :

- 4% pour les modèles de puissance assignée inférieure à 800 kVA,
- 6% au-delà.

Donner la définition de la tension de court-circuit d'un transformateur puis expliquer qualitativement son incidence sur la chute de tension en charge et sur le pouvoir de coupure des disjoncteurs de l'armoire TGBT N/R.

Définition de la tension de court-circuit :		
A puissance assignée identique	Incidence sur la chute de tension en charge	Incidence sur le pouvoir de coupure des disjoncteurs du TGBT N/R
Faible tension de court-circuit (exemple 4%)		
Forte tension de court-circuit (exemple 6%)		

Pour calculer la chute de tension en charge du transformateur, on propose d'établir le schéma équivalent à une phase (association d'un enroulement primaire et d'un enroulement secondaire, sur une même colonne du transformateur).

Vu des bornes d'un enroulement secondaire, le schéma équivalent retenu est celui de la figure C3.

Le transformateur a une puissance de 1250 kVA, sa documentation est donnée en ANNEXE 8 et il est alimenté par une distribution HT de 3 x 20 kV.

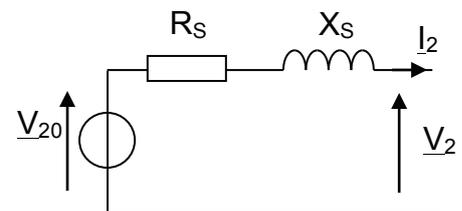


Figure C3

C6) Compléter le tableau suivant afin de ramener toutes les grandeurs électriques à une colonne du transformateur. Il faut tenir compte du couplage Dyn.

Désignation	unité	Notation	Valeur numérique
Puissance apparente par colonne	kVA	Sc	
Tension nominale aux bornes d'un enroulement primaire.	V	V ₁	
Tension nominale, à vide, aux bornes d'un enroulement secondaire.	V	V ₂₀	
Courant à vide dans un enroulement du primaire (couplage triangle)	A	J ₁₀	
Puissance à vide par colonne (ou pertes à vide par colonne)	W	Pc ₁₀	
Tension aux bornes d'un enroulement primaire, lors de l'essai en court-circuit.	V	V _{1cc}	
Courant de court circuit dans un enroulement secondaire (lors de l'essai en court-circuit)	A	I _{2cc}	
Puissance en court circuit par colonne (ou pertes par colonne, dues à la charge)	W	Pc _{1cc}	

C7) Donner l'expression littérale de la résistance R_S qui figure dans le schéma équivalent puis calculer sa valeur numérique (on rappelle que les pertes « cuivre » d'un transformateur sont les pertes dues à la charge).

Développement et expression littérale	Application numérique

C8) Donner l'expression littérale de la réactance X_S qui figure dans le schéma équivalent puis calculer sa valeur numérique.

Développement et expression littérale	Application numérique

Afin d'éviter les erreurs en cascade, on prendra pour la suite $R_S = 3 \text{ m}\Omega$ et $X_S = 15 \text{ m}\Omega$.

C9) Donner l'expression littérale de la chute de tension ΔV_2 , pour le transformateur en utilisation nominale, avec un facteur de puissance noté $\cos\varphi_2$ pour sa charge.
Effectuer l'application numérique pour $\cos\varphi_2 = 1$ puis $\cos\varphi_2 = 0.8$. On précisera pour chaque cas la valeur de la tension composée secondaire U_2 .

Développement et expression littérale	Application numérique
	$\cos\varphi_2 = 1 \rightarrow \Delta V_2 =$ $U_2 =$
	$\cos\varphi_2 = 0.8 \rightarrow \Delta V_2 =$ $U_2 =$

C10) Donner l'expression littérale du rendement du transformateur en fonction des grandeurs électriques dont notamment les pertes à vides P_{10} et la résistance R_S .
Effectuer l'application numérique pour un charge résistive avec $I_2 = I_{2N}$ puis $I_2 = I_{2N} / 2$.

Développement et expression littérale	Application numérique
	$I_2 = I_{2N}$ <i>Puissance utile</i> = <i>Pertes</i> = \rightarrow <i>Rend</i> =
	$I_2 = I_{2N} / 2$ <i>Puissance utile</i> = <i>Pertes</i> = \rightarrow <i>Rend</i> =

Partie D : L'onduleur d'injection de l'énergie sur le réseau

Raccordement au réseau alternatif des onduleurs

Voici un extrait du CCTP (Cahier des clauses techniques particulières) :

Les onduleurs seront câblés vers un tableau divisionnaire des générateurs solaires (TDGS) permettant leur regroupement. Depuis ce tableau, un câble partira vers le local dit «tarif jaune». Ce câble aboutira sur un tableau permettant l'interface avec ERDF.

Le tableau divisionnaire générateur solaire (TDGS), fermant à clé, comportera,

- un dispositif de coupure générale pouvant être consigné par cadenas,
- un dispositif de protection contre les surtensions transitoires, en particulier celles dues aux effets de la foudre,
- sur chaque « arrivée onduleur », un dispositif de protection contre les surintensités par disjoncteurs comprenant un dispositif différentiel pour la protection des personnes,
- sur un départ « auxiliaires », un dispositif de protection contre les surintensités par disjoncteurs comprenant un dispositif différentiel pour la protection des personnes. En effet, il faut alimenter en 230V des équipements dont le fonctionnement est lié au générateur photovoltaïque (ventilation, acquisition de mesures, communication...),
- des emplacements pour des protections supplémentaires pourront être prévus, de manière à anticiper les éventuelles extensions ultérieures du générateur photovoltaïque.

Le tableau d'interface avec ERDF comportera :

- un disjoncteur type abonné (AGCP*) faisant office de limite de concession,
- un sectionneur pouvant être consigné par cadenas (limite avale d'application de la norme NF C 14-100),
- un compteur d'énergie permettant de comptabiliser l'énergie produite sur le réseau,
- un compteur d'énergie permettant de comptabiliser l'énergie consommée sur le réseau, notamment par les services auxiliaires sur le circuit de production.

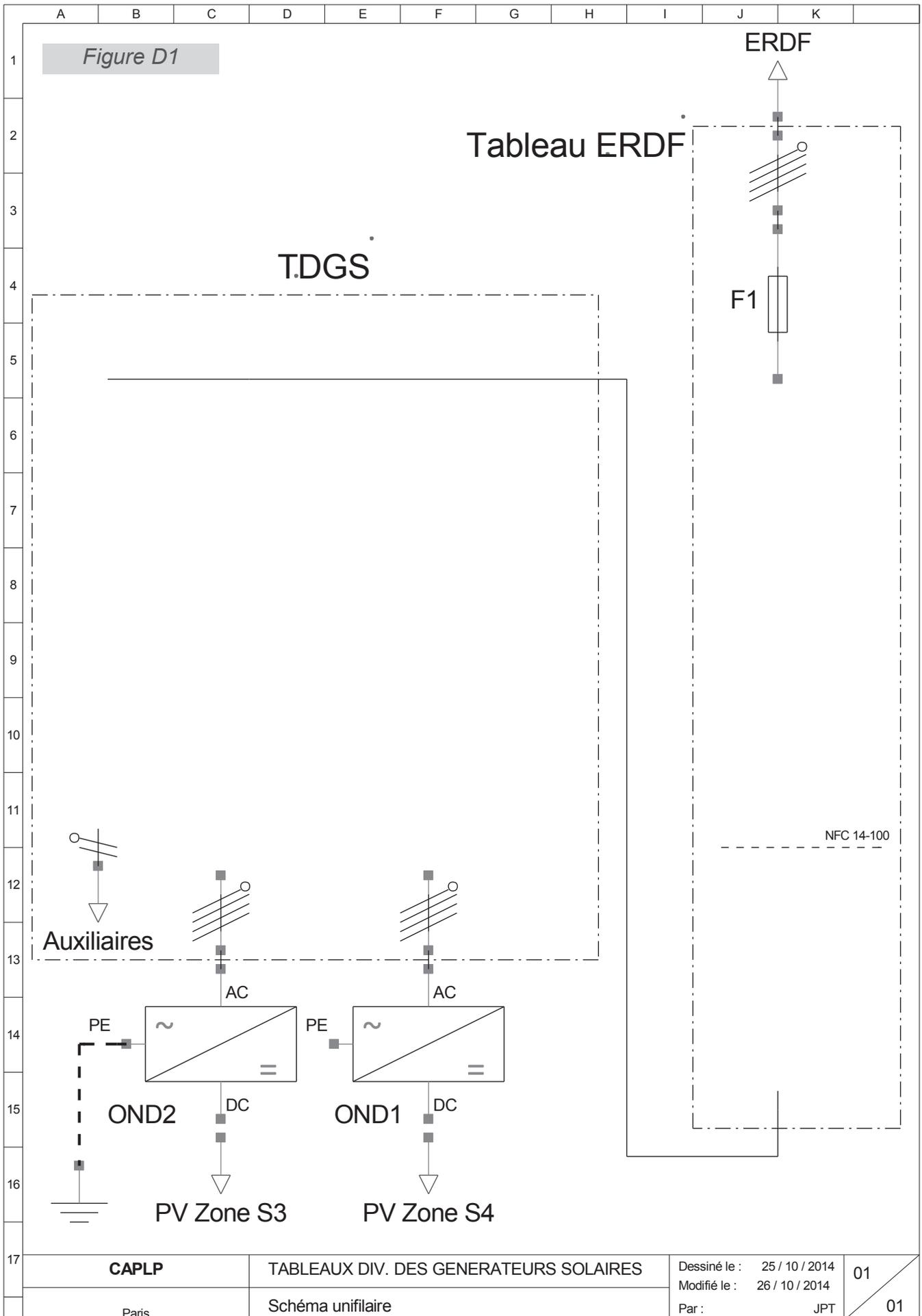
D1) Compléter le schéma unifilaire de raccordement de la figure D1, page suivante. Pour simplifier, il ne sera représenté que les arrivées des onduleurs des zones S3 et S4.

Le jury appréciera :

- la propreté du schéma,
- le respect des normes de représentation des appareillages,
- la conformité par rapport au CCTP, donné précédemment.

* L'AGCP (Appareil Général de Commande et de Protection) est un disjoncteur différentiel. C'est le dernier organe de coupure avant le réseau ERDF. Pour les chantiers de moins de 36kWc, c'est ERDF qui le fournit et le pose. Par contre pour les chantiers plus importants (tarif jaune) c'est à l'installateur de le fournir. Généralement cet AGCP est placé dans une armoire en limite de propriété qui doit aussi être fournie par l'installateur.

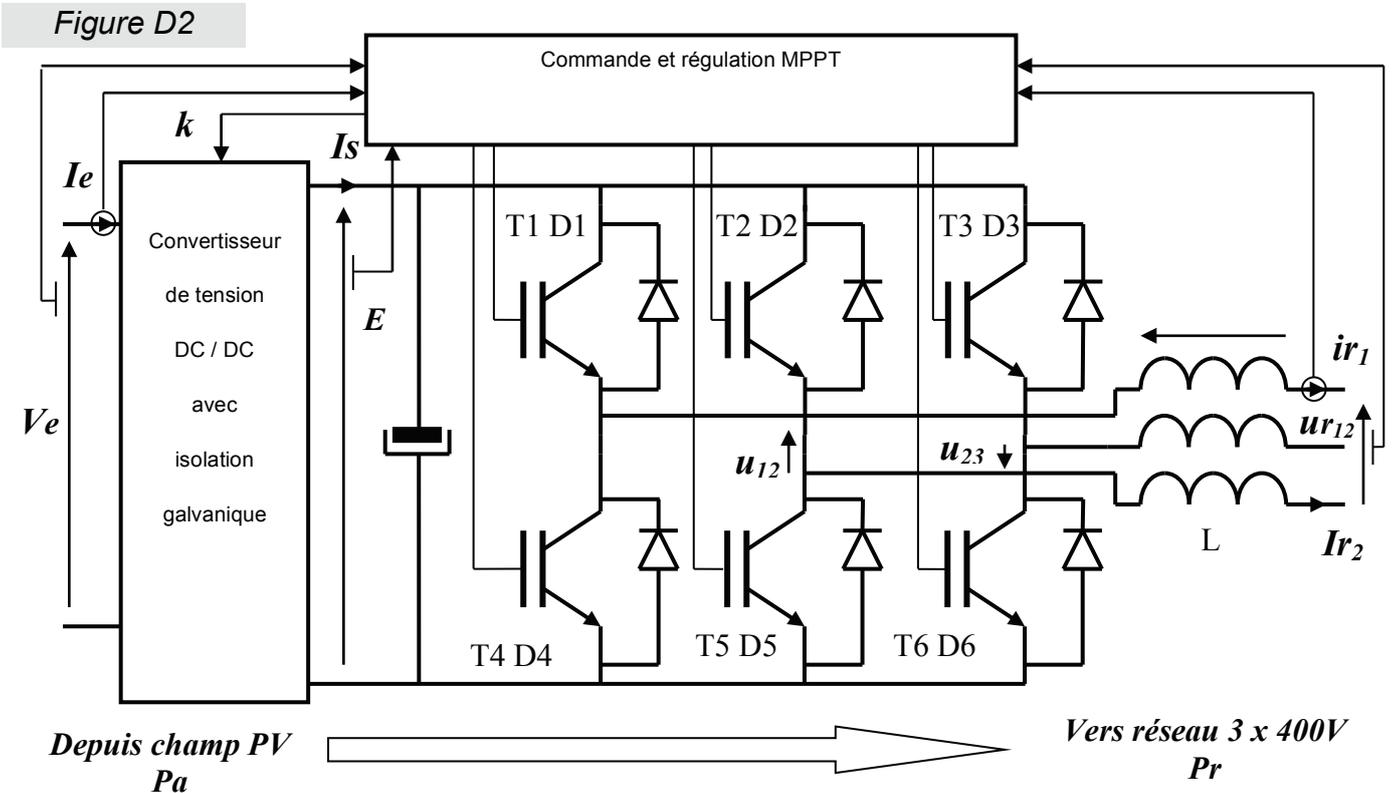




Fonctionnement de l'onduleur

Afin d'établir une fiche de maintenance des onduleurs on s'intéresse au fonctionnement de l'onduleur SMA Tripower 15000 TL, abordé de façon externe dans la partie B de ce sujet. Sa documentation est fournie en ANNEXE 5.

La structure interne de cet appareil est détaillée sur la figure D2.



Puissances disponibles

Dans cette partie, on considèrera que le champ PV fournit une tension continue, $V_e = 600$ V, lorsqu'il fonctionne en son point de puissance maximum.

Le convertisseur DC / DC présente une fonction de transfert k , linéarisée autour du MPP : $k = E / V_e = I_e / I_s$.

Les interrupteurs statiques de l'onduleur sont commandés en modulation de largeur d'impulsion (MLI) afin d'injecter sur le réseau des courants quasi sinusoïdaux.

Dans le but de simplifier le questionnement, on considèrera les interrupteurs parfaits et une commande « pleine onde » telle qu'indiquée sur la figure D3 : les interrupteurs d'un même bras sont commandés de façon complémentaire (exemple T1 est commandé à la fermeture pendant la moitié de la période lorsque T4 est bloqué, puis vice et versa).

D2) Tracer sur la figure D3, les graphes des tensions u_{12} et u_{13} .

D3) Exprimer v_1 (tension simple de la phase 1 de l'onduleur par rapport au neutre du réseau) en fonction de u_{12} et u_{13} .



D4) Tracer sur la figure D3, le graphe de la tension v_I .

D5) Superposer aux graphes de u_{12} et v_I l'allure de leur fondamentaux u_{12f} et v_{If} .

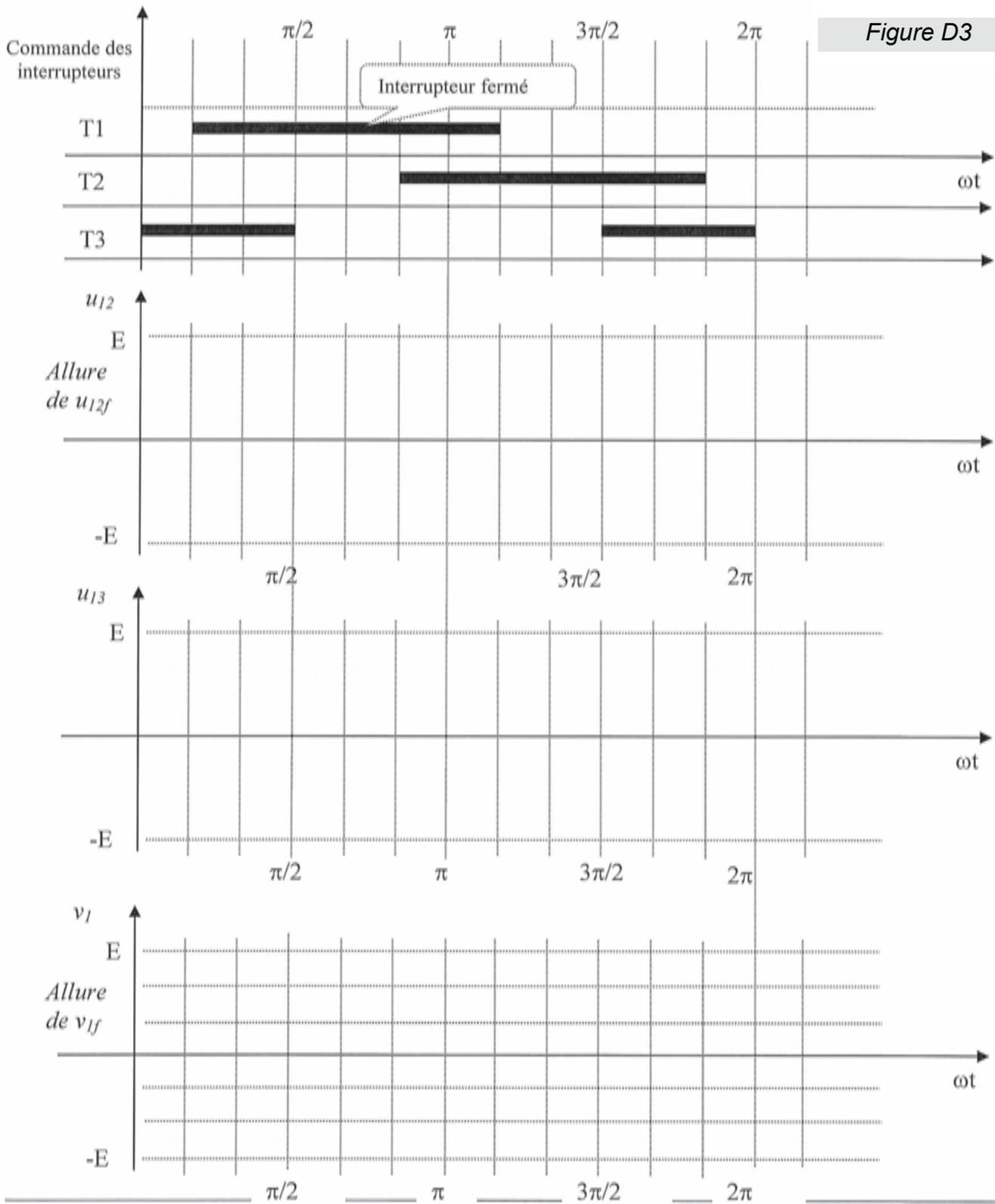


Figure D3

La décomposition en série de Fourier de u_{12} s'écrit :

$$u_{12} = \frac{2.E.\sqrt{3}}{\pi} \left(\sin\omega t + \frac{\sin(5.\omega t)}{5} + \frac{\sin(7.\omega t)}{7} + \frac{\sin(11.\omega t)}{11} + \dots \right)$$

D6) Exprimer la valeur efficace U de u_{12f} puis calculer le coefficient k d'élévation de tension du convertisseur DC / DC afin que $U = 420$ V.

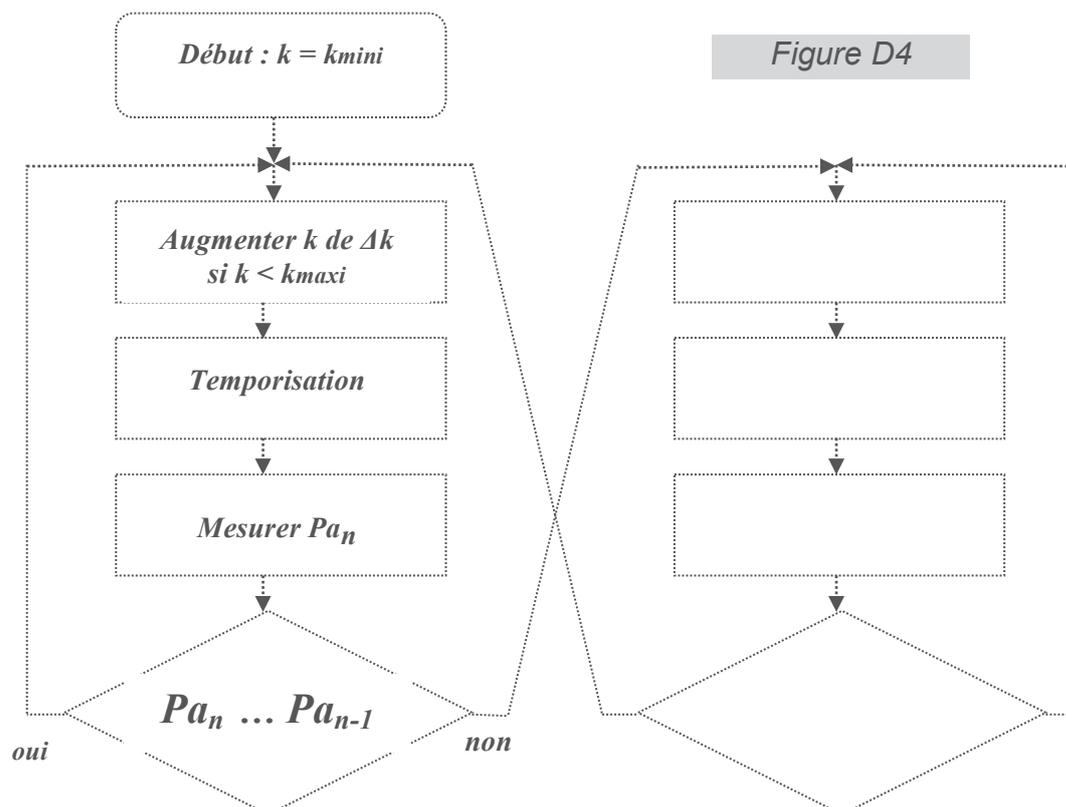
Valeur efficace U de u_{12f}	Calcul de k

D7) L'onduleur Tripower 15000 TL peut suivre le point de puissance maximale (MPP) pour une large gamme de tension d'entrée. Calculer l'intervalle de variation possible pour k .

Valeur mini	Valeur maxi

Pour suivre le point de puissance maximale, la commande de l'onduleur utilise un algorithme P&O (perturbe and observe) de la figure D4. C'est une méthode itérative : ainsi à l'itération n , le calculateur de la commande calcule la nouvelle valeur de k . On note Pa_n la puissance absorbée à l'instant de l'itération n .

D8) Compléter l'algorithme de la figure D4.



D9) C'est un onduleur de tension (les tensions u_{12} , u_{23} et u_{31} sont imposées par les commandes complémentaires des bras d'interrupteurs). Justifier la fonction de l'inductance L .

1^{ère} fonction :

2^{ème} fonction :

Règlementation Thermique des Bâtiments Neufs



Que disent les textes réglementaires ?

Arrêté du (extraits) *Arrêté du 26 octobre 2010 relatif aux caractéristiques thermiques et aux exigences de performance énergétique des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments*

Arrêté du 28 décembre 2012 relatif aux caractéristiques thermiques et aux exigences de performance énergétique des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments autres que ceux concernés par l'article 2 du décret du 26 octobre 2010 relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des constructions

Art. 1^{er}. Le présent arrêté a pour objet de déterminer les modalités d'application des règles édictées à l'article R. 111-20 du code de la construction et de l'habitation

Les dispositions du présent arrêté s'appliquent aux bâtiments ou partie de bâtiment répondant simultanément aux conditions suivantes :

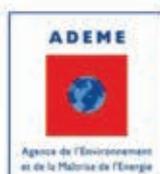
- bâtiments chauffés ou refroidis afin de garantir le confort des occupants dans des conditions fixées par convention.
- bâtiments ou parties de bâtiment à usage de bureau et d'enseignement, aux établissements ou parties d'établissement d'accueil de la petite enfance et aux bâtiments ou parties de bâtiment à usage d'habitation, bâtiments universitaires d'enseignement et de recherche, hôtels, restaurants, commerces, gymnases et salles de sports y compris les vestiaires, établissements de santé, établissements d'hébergement pour personnes âgées et établissements d'hébergement pour personnes âgées dépendantes, aéroports, tribunaux et palais de justice et bâtiments à usage industriel et artisanal.

Elles ne s'appliquent pas :

- aux constructions provisoires prévues pour une durée d'utilisation de moins de deux ans ;
- aux bâtiments et parties de bâtiment dont la température normale d'utilisation est inférieure ou égale à 12 °C ;
- aux bâtiments ou parties de bâtiment destinés à rester ouverts sur l'extérieur en fonctionnement habituel ;
- aux bâtiments ou parties de bâtiment qui, en raison de contraintes spécifiques liées à leur usage, doivent garantir des conditions particulières de température, d'hygrométrie ou de qualité de l'air, et nécessitant de ce fait des règles particulières ;
- aux bâtiments ou parties de bâtiment chauffés ou refroidis pour un usage dédié à un procédé industriel ;
- aux bâtiments agricoles ou d'élevage
- aux bâtiments servant de lieux de culte et utilisés pour des activités religieuses ;
- aux bâtiments situés dans les départements d'outre-mer.

(en bleu les évolutions par rapport à la RT 2005)

(en mauve les compléments de l'arrêté du 28 décembre 2012)



Règlementation Thermique des Bâtiments Neufs



Quelques précisions

Les textes réglementaires excluent à leur article premier les bâtiments :

- **chauffés ou refroidis pour un usage dédié à un procédé industriel**

Un usage dédié à un procédé industriel est une activité exclusivement liée à un ou des processus de fabrication ou de conservation ou tout autre usage imposant des conditions particulières de température, d'hygrométrie ou de qualité de l'air. Les équipements qu'ils soient de chauffage, de climatisation, de ventilation ou d'éclairage sont dimensionnés pour permettre le bon déroulement du process et non pour assurer le confort des personnes. Les apports de chaleurs dus au process ne peuvent pas être pris en compte par la méthode de calcul (Ex : hauts-fourneaux,...)

- **destinés à « rester ouverts sur l'extérieur en fonctionnement habituel »**

Il s'agit de bâtiments ou de parties de bâtiment ouverts sur l'extérieur de manière permanente comme un hall de gare ou un commerce en rez-de-chaussée ouvert sur l'extérieur (boucheries, poissonneries,...).

Hors champ d'application de la RT2012

Certains usages de bâtiment ne sont pas soumis à la réglementation thermique 2012 en raison des spécificités liées à leurs usages (Hygrométrie, apports internes, grande variabilité de l'occupation,...) qui ne permettent pas de définir un scénario conventionnel. Bien évidemment, ces bâtiments peuvent mettre en œuvre des stratégies pour prendre en compte les enjeux de réductions des consommations d'énergie et leur conception nécessite de tenir compte de ces enjeux.

Ce sont les:

- Lieux de culte
- Salles de spectacle : théâtre, cinéma, opéra, auditorium
- Musées, salles d'exposition
- Piscines, patinoires, saunas, hammams (dont vestiaires)
- Etablissements pénitentiaires
- Salles polyvalentes, salles des fêtes
- Salles de conférences
- Médiathèques et bibliothèques municipales

ANNEXE 2 (page 1/2) : Détails des éclairages de la salle de répétition N°1

LUMINAIRE

Type Profilé diffusant à éclairage direct

Donnée caractéristique du luminaire $\Phi = 0,80.E+0,00.T$

Classe électrique : IP 20

Puissance avec source 2x54 W au niveau de la scène et 1x14W au niveau des gradins

Ballast/transformateur intégré

Couleur au choix de l'architecte

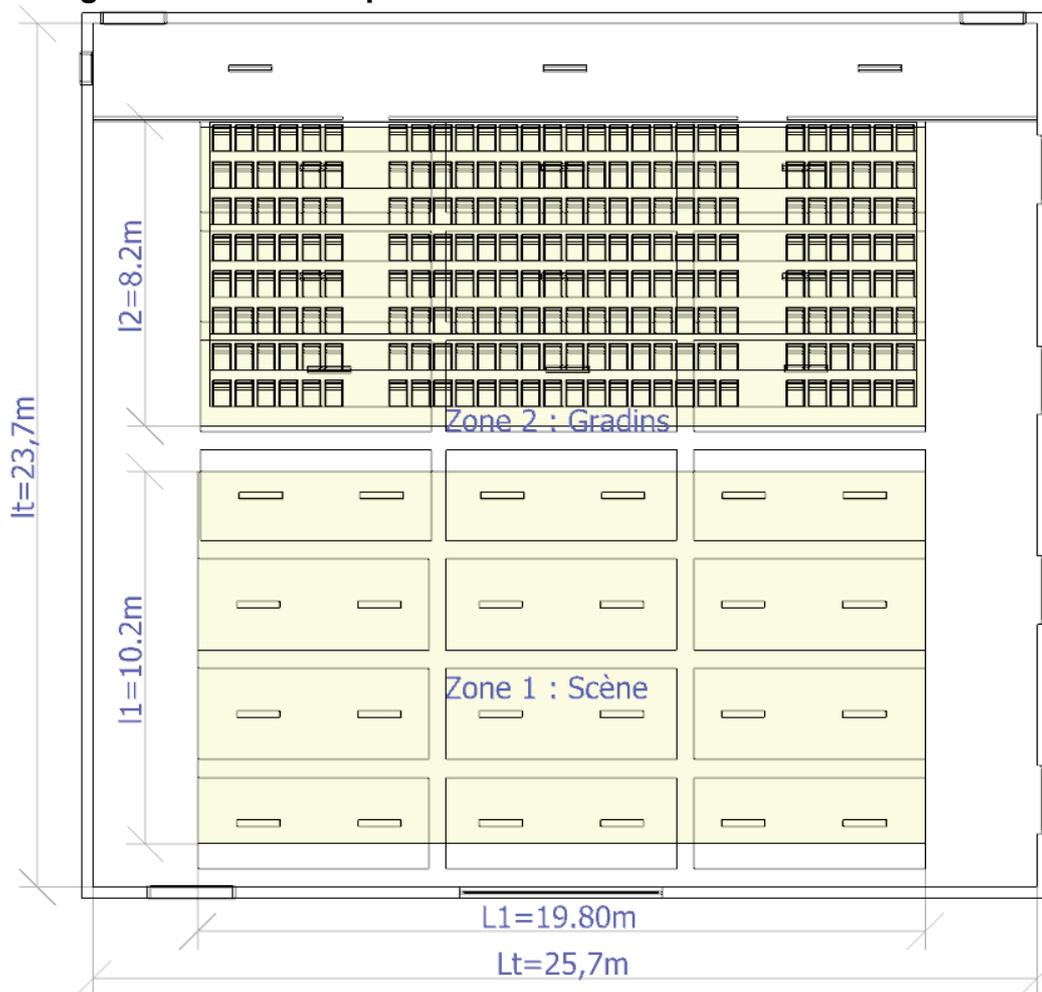
Remarques Le luminaire peut être suspendu ou encastré (adapter le système d'accroche)

Ligne continue en plan : le profilé et le diffusant ne doivent pas être coupés.

SOURCES

Type Tube fluorescent $\varnothing 16\text{mm}$	Type Tube fluorescent $\varnothing 16\text{mm}$
Nombre par luminaire 1	Nombre par luminaire 1
Puissance 54 W	Puissance 14 W
Tension 230 V	Tension 230 V
Flux 4450 lm	Flux 1230 lm
Intensité dans l'axe - cd	Intensité dans l'axe - cd
Couleur de lumière 3000 K	Couleur de lumière 3000 K
IRC 85	IRC 85
Culot G5	Culot G5
Durée de vie 19000 h	Durée de vie 19000 h

Zones d'éclairage de la salle de répétition N°1

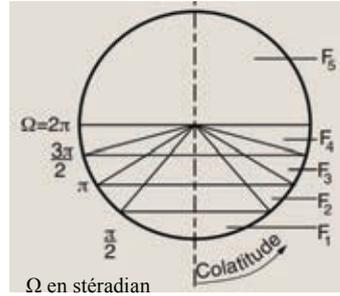


ANNEXE 2 (page 2/2)

La norme UTE C 71 121 détermine un certain nombre de répartitions du flux lumineux repérées par des lettres.

En fonction des flux partiels F_1 , F_2 , F_3 , F_4 et F_5 repérés dans la figure ci-dessous :

Classe	Catégorie de luminaire
A, B, C, D, E	F1 direct intensif
F, G, H, I, J	F2 direct extensif
K, L, M, N	F3 semi-direct
O, P, Q, R, S	F4 mixte
T	F5 indirect



Le classement synthétique des luminaires est souvent utilisé :

LUMINAIRE	DIRECT INTENSIF	DIRECT EXTENSIF	SEMI-DIRECT	INDIRECT
CLASSE PHOTOMETRIQUE	CLASSE A à E	CLASSE F à J	Superposition de : - App. direct classe A à J - App. Indirect	CLASSE T
REPARTITION D'INTENSITE				

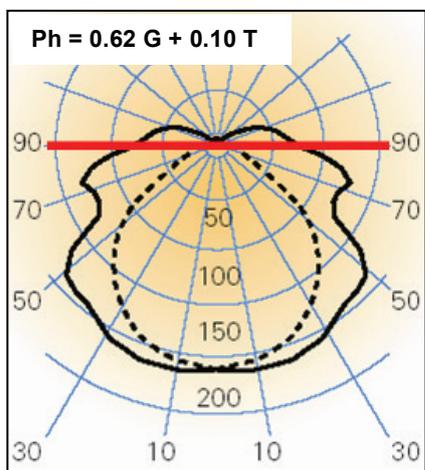
les luminaires émettant uniquement vers le bas (éclairage direct) sont repérés par une lettre comprise entre A et J précédé du rendement en service.

les luminaires émettant vers le haut et vers le bas sont symbolisés par 2 lettres correspondant à deux luminaires fictifs (éclairage direct et éclairage indirect) chacune étant précédée du rendement en service correspondant.

les luminaires émettant vers le haut uniquement (éclairage indirect) sont repérés par la lettre T précédé du rendement.

Un luminaire est caractérisé par son équation photométrique de la forme : $Ph = \eta_i \cdot X + \eta_s \cdot T$

Soit la caractéristique d'un luminaire :



Lumière émise dans la partie supérieure :
- rendement η_s
- Classe : une seule lettre : T (indirect)

plan du luminaire

Lumière émise dans la partie inférieure :
- rendement η_i
- Classe : une lettre X de A à J (direct)

$\eta_s = 0.10 \Rightarrow 10\%$ vers le haut

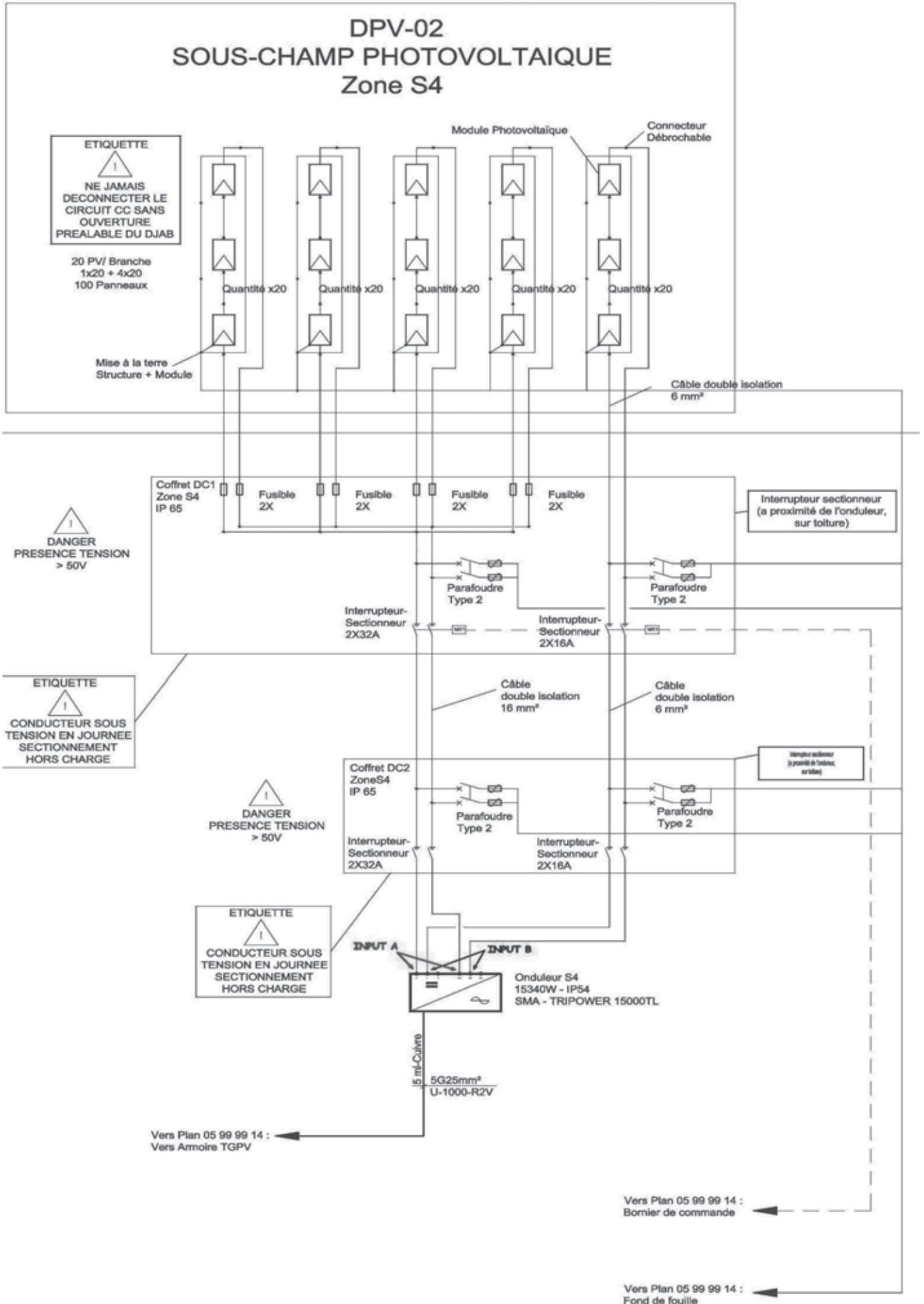
Classe : T \Rightarrow indirect

Ici le constructeur précise : $Ph = 0.62 G + 0.10 T$

Classe : G \Rightarrow direct extensif

$\eta_i = 0.62 \Rightarrow 62\%$ vers le bas

ANNEXE 3 : Schéma du sous champ photovoltaïque, zone S4



ANNEXE 4 : caractéristiques des câbles

Câble C1

Câble de chaîne

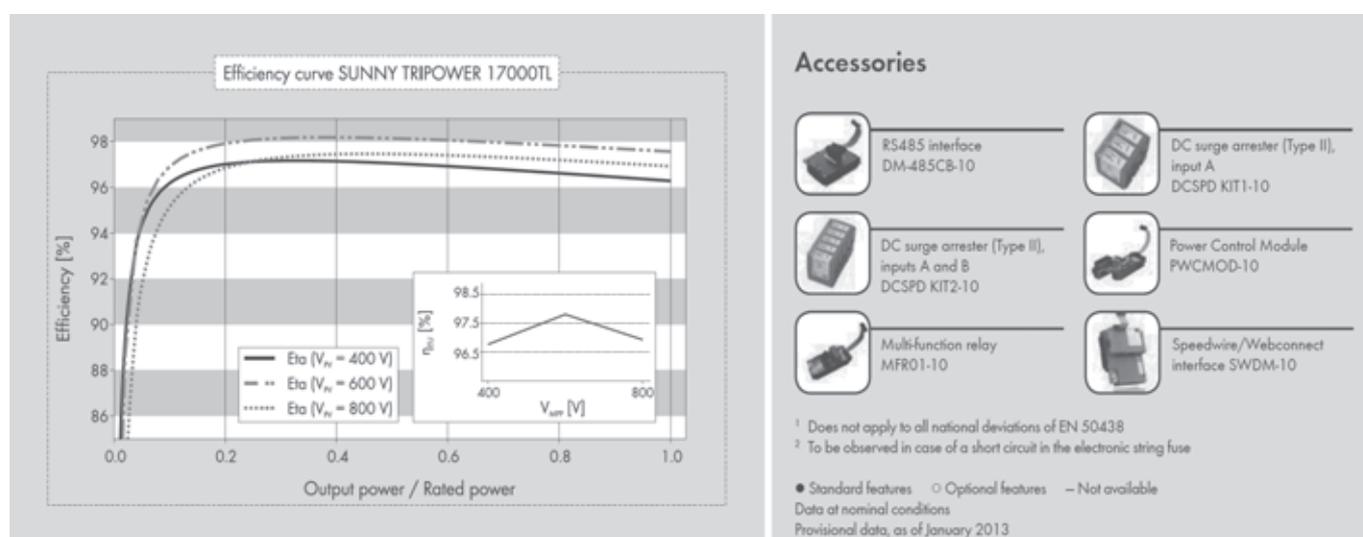
Référence: ENERGYFLEX PV 1x6 Marque: Nexans
 Longueur: 10 m Section: 6 mm² Nature du câble: Cu Nb câbles par polarité NbCab: 1
 Mode de pose 3A: Câbles mono- ou multiconducteurs dans des conduits en montage apparent.

Câble C2

Câble de groupe

Référence: ENERGYFLEX PV 1x16 Marque: Nexans
 Longueur: 100 m Section: 16 mm² Nature du câble: Cu Nb câbles par polarité NbCab: 1
 Mode de pose 3A: Câbles mono- ou multiconducteurs dans des conduits en montage apparent.

ANNEXE 5 : Caractéristiques techniques de l'onduleur « Sunny Tripower 15000 TL »



Technical Data	Sunny Tripower 15000TL	Sunny Tripower 17000TL
Input (DC)		
Max. DC power (@ cos φ=1)	15340 W	17410 W
Max. input voltage	1000 V	1000 V
MPP voltage range / rated input voltage	360 V - 800 V / 600 V	400 V - 800 V / 600 V
Min. input voltage / initial input voltage	150 V / 188 V	150 V / 188 V
Max. input current input A / input B	33 A / 11 A	33 A / 11 A
Max. input current per string input A ² / input B ²	40 A / 12.5 A	40 A / 12.5 A
Number of independent MPP inputs / strings per MPP input	2 / A:5; B:1	2 / A:5; B:1
Output (AC)		
Rated power (@ 230 V, 50 Hz)	15000 W	17000 W
Max. apparent AC power	15000 VA	17000 VA
Nominal AC voltage	3 / N / PE; 220 / 380 V 3 / N / PE; 230 / 400 V 3 / N / PE; 240 / 415 V	3 / N / PE; 220 / 380 V 3 / N / PE; 230 / 400 V 3 / N / PE; 240 / 415 V
Nominal AC voltage range	160 V - 280 V	160 V - 280 V
AC power frequency / range	50 Hz, 60 Hz / -6 Hz ... +5 Hz	50 Hz, 60 Hz / -6 Hz ... +5 Hz
Rated grid frequency / rated grid voltage	50 Hz / 230 V	50 Hz / 230 V
Max. output current	24 A	24.6 A
Power factor at rated power	1	1
Adjustable displacement factor	0.8 overexcited... 0.8 underexcited	0.8 overexcited... 0.8 underexcited
Phase conductors / connection phases	3 / 3	3 / 3
Efficiency		
Max. efficiency / European efficiency	98.2% / 97.8%	98.2% / 97.8%

ANNEXE 6 : Extrait de la norme UTE C 15-712 relative aux installations photovoltaïques

7 Protection contre les surintensités

7.1 Partie courant continu

7.1.1 Protection contre les surintensités

Chaîne PV :

Les câbles des chaînes PV sont dimensionnés afin de pouvoir se dispenser des dispositifs de protection contre les surcharges et les courts-circuits. Le courant admissible du câble doit être égal ou supérieur à 1,25 fois I_{scSTC} de la chaîne PV.

Les modules des chaînes PV doivent être protégés contre l'effet des courants inverses susceptibles de survenir en cas de défaut dans un module. Les modules supportant un courant inverse maximal I_{scr} au moins deux fois leur courant de court-circuit (I_{scSTC}), cette protection et les courants admissibles sont donnés dans le Tableau ci-dessous.

Tableau 1 – Courants admissibles dans les câbles de chaîne PV et choix des fusibles de protection

Nombres de chaînes	Courant inverse susceptible de survenir dans une chaîne	Courant assigné I_n du fusible de la chaîne	Courant admissible I_z dans le câble de la chaîne PV
1 à 2	$1,25 I_{scSTC}$	Sans objet	$\geq 1,25 I_{scSTC}$
3	$2 \times 1,25 I_{scSTC}$	Sans objet	$\geq 2 \times 1,25 I_{scSTC}$
$n > 3$	$(n-1) \times 1,25 I_{scSTC}$	$1,25 I_{scSTC} \leq I_n \leq 2 I_{scSTC}$	$\geq 2 I_n$
I_{scSTC} correspond au courant d'une chaîne			
n correspond au nombre total de chaînes du générateur PV			

En présence de parafoudre, cette protection doit être assurée sur chaque polarité.

Câble groupe PV :

Les câbles des groupes PV sont dimensionnés afin de pouvoir se dispenser des dispositifs de protection contre les surcharges et les courts-circuits. Le courant admissible du câble I_z doit être égal ou supérieur à $(m-1) \times 1,25$ fois I_{scSTC} du groupe PV, (m correspond au nombre total de groupes PV).

Câble principal PV :

Les câbles des générateurs PV sont dimensionnés afin de pouvoir se dispenser des dispositifs de protection contre les surcharges et les courts-circuits. Le courant admissible du câble I_z doit être égal ou supérieur à 1,25 fois I_{scSTC} du générateur PV.

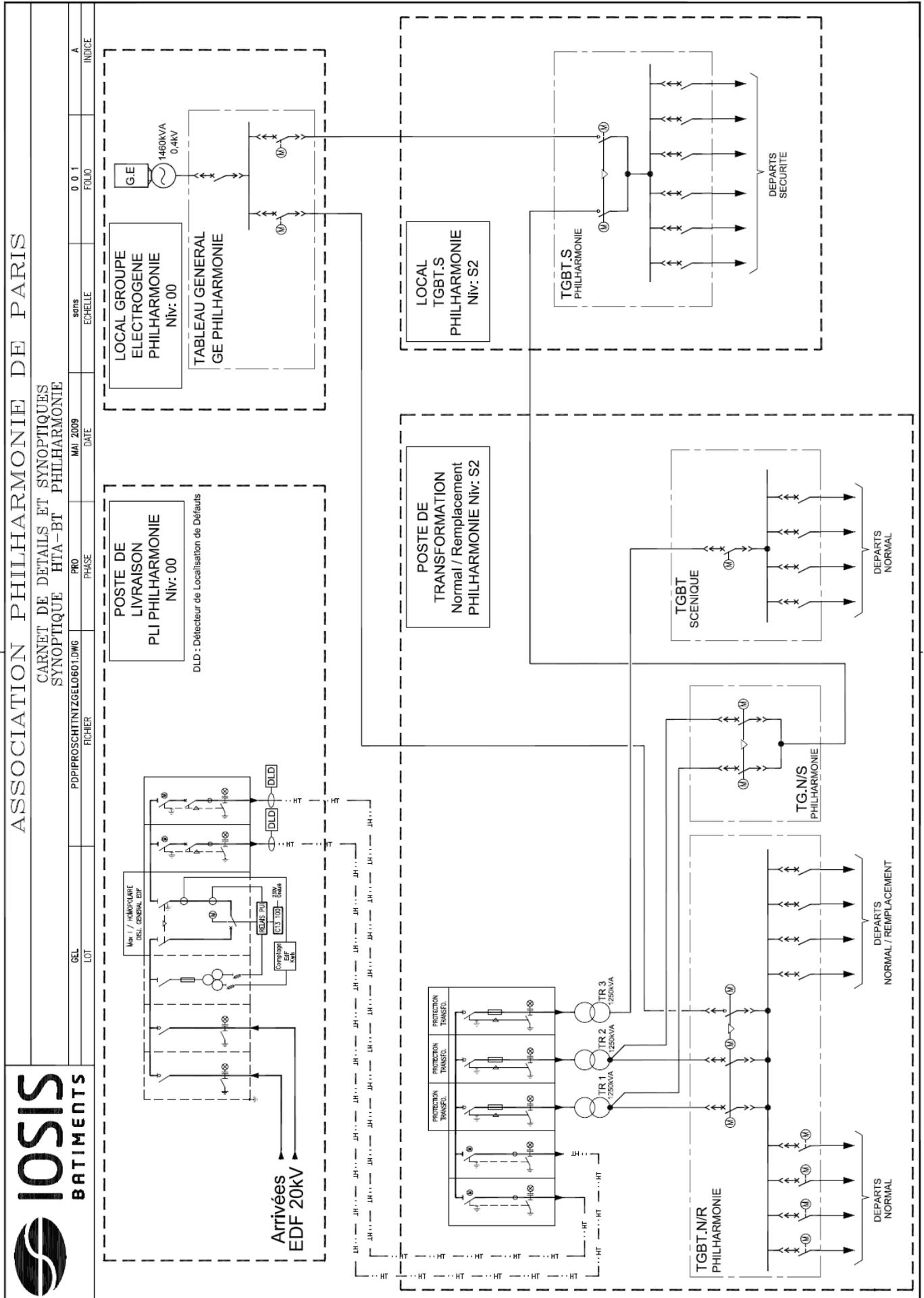
8 Chute de tension

L'optimisation technico-économique conduit à réduire au maximum les chutes de tension.

8.1 Installation à courant continu

La chute de tension maximale autorisée dans la partie courant continu de l'installation est de 3 % à I_{scSTC} . Il est recommandé de limiter cette chute de tension à 1 %.

ANNEXE 7 : Distribution électrique principale



ANNEXE 8 : Caractéristique du transformateur de distribution TR2

Transformateurs de Distribution Immergés dans L'huile

Norme NF C 52-112-1

Ce sont des transformateurs immergés dans l'huile minérale, à cuve hermétique à ailettes. Le refroidissement est naturel, du type ONAN. Les enroulements sont en cuivre ou aluminium et le circuit magnétique est en tôle à cristaux orientés.

Tensions Normalisées

- Tension assignée primaire: 15 ou 20 kV (réglage $\pm 2,5\%$ par commutateur manoeuvrable hors tension)
- Tension assigné secondaire: 410 V à vide.

Couplage

- Dyn



Puissance assignée	kVA	100	160	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500
Pertes à vide	W	210	460	650	800	930	1100	1300	1220	1470	1800	2300	2750	3350
Pertes dues à la charge	W	2150	2350	3250	3900	4600	5500	6500	10700	13000	16000	20000	25500	32000
Tension de court-circuit	%	4	4	4	4	4	4	4	6	6	6	6	6	6
Courant assigné BT	A	140,8	225,3	352,0	443,6	563,3	704,1	887,1	1126,5	1408,2	1760,2	2253,1	2816,3	3520,4
Courant à vide (I_0/I_n)	%	0,8	3,6	2,8	3,7	3,1	3,0	3,2	1,5	1,5	1,5	1,6	2,2	2,3
Courant d'enclenchement														
Valeur de crête (I_e/I_n)		15	17	16	16	16	16	15	11	11	10	10	11	11
(constante de temps=0,1s)														