

C.A.P.E.T. INTERNE ET C.A.E.R. GÉNIE ÉLECTRIQUE

OPTION : ÉLECTROTECHNIQUE ET ÉNERGIE

Section génie électrique

Épreuve écrite d'admissibilité

Durée : 6 heures. Coefficient : 1

Étude d'un système technique et/ou d'un processus technique et/ou d'un équipement : **épreuve spécifique à chacune des trois options.**

Cette épreuve à caractère technologique prend appui sur un système technique et/ou un processus technique et/ou un équipement.

Elle permet d'évaluer les connaissances scientifiques et techniques du candidat et sa capacité à les mobiliser pour résoudre un problème technique.

La documentation technique fournie au candidat peut comprendre notamment :

- un dossier de description et de spécification de tout ou partie d'un système technique et/ou d'un processus technique et/ou d'un équipement ;
- des schémas, graphes et représentations diverses précisant l'organisation structurelle et/ou fonctionnelle et/ou temporelle du système technique et/ou du processus technique et/ou de l'équipement étudiés ;
- des informations sur le processus et les procédés associés ;
- des caractéristiques techniques et des données numériques résultant de calculs et des simulations informatiques ;
- des propositions de modification d'éléments du cahier des charges.

Il peut être demandé au candidat :

- de conduire l'analyse de tout ou partie du système étudié ou du processus ou de l'équipement et de le modéliser totalement ou partiellement ;
- d'effectuer des calculs de prédétermination ;
- d'exploiter des résultats de simulation ou de calculs informatiques ;
- de proposer, en réponse à une modification du cahier des charges, des évolutions architecturales du système et/ou des solutions constructives permettant de satisfaire aux nouvelles fonctions ;
- d'analyser un produit, un moyen de production ou un service afin d'en optimiser certaines fonctions relatives au génie électrique.

L'épreuve permet d'évaluer :

- les connaissances scientifiques et techniques du candidat ;
- la qualité des analyses conduites et la pertinence du choix des modèles utilisés ;
- l'exactitude des résultats ;
- la pertinence et la cohérence des solutions proposées ;
- la qualité graphique des documents produits, la rigueur du vocabulaire technique, le respect des normes et conventions de représentation ;
- la clarté et la rigueur de l'expression écrite et de la composition.

Épreuve pratique et orale d'admission

Durée : 8 heures. Coefficient : 2

Exploitation pédagogique de travaux pratiques : épreuve spécifique à chacune des trois options.

Cette épreuve permet d'évaluer les savoirs et savoir-faire caractéristiques des champs technologiques de l'option concernée et de les exploiter à des fins d'enseignement.

Le sujet proposé nécessite la mise en œuvre de tout ou partie d'un système technique au travers d'une activité de travaux pratiques.

Le candidat est conduit à :

- analyser et mettre en œuvre le travail pratique demandé ;
- évaluer la qualité des résultats obtenus ;
- à partir du travail pratique réalisé, proposer une exploitation pédagogique, spécifique de l'option concernée, et se référant au programme de sciences et techniques industrielles d'une classe de second cycle technologique de lycée précisée par le jury ; cette exploitation pédagogique peut comprendre une ou plusieurs séquences d'enseignement ; elle doit permettre au candidat de :
 - définir les objectifs de l'exploitation pédagogique qu'il propose ;
 - situer sa ou ses séquences d'enseignement dans la progression de l'année ;
 - justifier les choix pédagogiques retenus (cours, travaux pratiques, travaux dirigés, modes d'organisation et stratégies) pour atteindre les objectifs fixés ;
 - préciser les documents utilisés par le professeur, ceux qui sont remis aux élèves ainsi que les matériels et équipements utilisés ;
 - indiquer les modalités d'évaluation prévues.

L'épreuve permet d'évaluer :

- la pertinence de l'organisation proposée ;
- la maîtrise des savoirs et savoir-faire caractéristiques du champ technologique concerné ;
- le niveau de la réflexion pédagogique conduite par le candidat ;
- la connaissance des contenus d'enseignement et des finalités de la discipline et de la spécialité ;
- la qualité des documents techniques produits ;
- les qualités d'expression et de communication.

SESSION ANNEE 2001

CAPET

CONCOURS INTERNE

Section : GÉNIE ELECTRIQUE

Option : ELECTROTECHNIQUE ET ÉNERGIE

ETUDE D'UN SYSTÈME TECHNIQUE ET/OU PROCESSUS TECHNIQUE

DURÉE : 6 HEURES

Aucun document n'est autorisé.

Calculatrice autorisée (conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999)

ECLAIRAGE DU STADE DE FRANCE

Ce sujet comporte 4 cahiers distincts :

Cahier N° 1	Présentation et questionnaire en 4 parties (A à D)	11	pages
Cahier N° 2	Annexes B1 à B14 et Annexes C1 à C10	24	pages
Cahier N° 3	Tableaux et Figures nécessaires aux parties C et D	4	pages
Cahier N° 4	Documents réponse (Partie A, questions C.2.4 et D.3)	3	pages

Ce sujet comporte quatre parties indépendantes qui devront faire l'objet d'une rédaction sur des copies séparées en prenant soin d'en numéroté chaque page.

Même si une partie n'est pas traitée, le candidat veillera à rendre une copie vierge avec un en-tête dûment complété et l'inscription du repère de la partie non traitée.

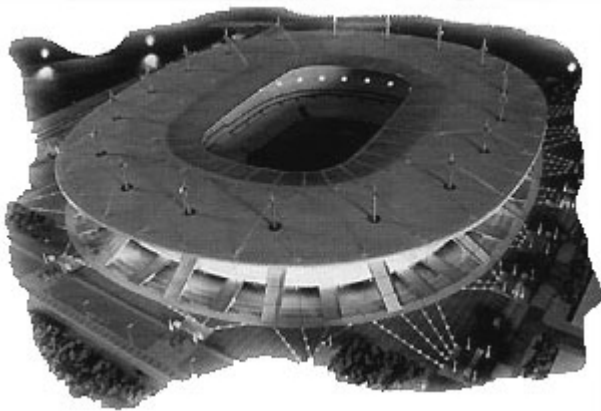
Il est vivement conseillé au candidat, de lire entièrement le sujet avant de répondre aux questions posées. Le temps de lecture préconisé est d'environ 30 mn.

Les candidats utiliseront les notations propres au sujet, présenteront clairement leurs calculs et encadreront les résultats attendus.

Le passage d'une forme littérale à son application numérique se fera dans le respect de la position de chaque grandeur exprimée. Le résultat numérique sera donné avec son unité.

Les correcteurs apprécient une copie soignée et rédigée lisiblement.

PRESENTATION



Maquette du Stade de France (Site Web France 2)

Dernier grand chantier du XX^{ème} siècle, le **Stade De France** a été conçu pour une capacité de 80 000 places couvertes. D'un coût de 2,7 milliards de francs, environ 412 millions d'euros (€) son exploitation a été concédée jusqu'en 2005 à un consortium privé, composé des entreprises Bouygues, GTM et SGE qui ont participé au financement de la construction à hauteur de 53 %.

L'architecture remarquable du site se justifie par la visibilité qui est offerte aux spectateurs. D'un empannement de 270 m de longueur pour 230 m de largeur, le **Stade De France** s'élève à une hauteur de 35 m depuis le parvis et de 45 m depuis la pelouse. Son immense corolle elliptique est suspendue à 18 "aiguilles d'acier". Le spectateur y est gagnant puisqu'aucun poteau ne vient gêner la vision latérale,

qu'il se trouve à une distance comprise entre 15 m et 25 m d'une ligne de touche et qu'il dispose d'un dégagement de 10 à 23 cm au dessus du spectateur assis devant lui.

Ce stade étant le lieu privilégié de grandes manifestations ; il dispose d'un éclairage dont les normes sont compatibles avec la retransmission télévisée haute définition. Ce dispositif, spécialement agencé pour éviter les effets de barreaux lors d'une perte accidentelle de deux projecteurs consécutifs, permet un niveau d'éclairage :

- de 1 600 lux pour les grandes manifestations ;
- de 800 lux pour les manifestations classiques ;
- de 300 lux pour l'entraînement et de 100 lux pour l'entretien.

Un total de 731 projecteurs est installé dont 454 en toiture assurant l'éclairage de la pelouse pour une puissance absorbée d'environ 1 MW.

La puissance totale installée au **Stade De France** est d'environ 17 MVA. L'installation électrique comporte :

- 21 transformateurs 20 kV/400 V ;
- 4 alimentations sans coupure ;
- 6 groupes électrogènes.

A partir de 48 cellules HTA, on alimente 379 tableaux basse tension aux travers de 90 km de chemin de câbles et 140 km de gaines à l'aide d'environ 500 km de câbles.

Pour gérer un tel édifice, il a été prévu un pilotage par gestion technique centralisée assurant une sécurité renforcée et une continuité de service de haut niveau.

PARTIE A

Analyse de la structure de la distribution HTA

Le document réponse Partie A (format A3) représente le schéma unifilaire de la distribution HTA du Stade de France.

Le croquis ci-contre représente une vue aérienne simplifiée du stade avec la position des colonnes montantes.

A.1 : Quelle est la structure de distribution retenue pour l'alimentation du stade ? **Justifiez** votre réponse ;

A.2 : A l'aide d'un stylo de couleur rouge, **retracez** sur le document réponse Partie A, le circuit correspondant au mode de fonctionnement sécurité ;

A.3 : A l'aide d'un stylo de couleur bleue, **retracez** sur le document réponse Partie A, le circuit correspondant au mode de fonctionnement remplacement ;

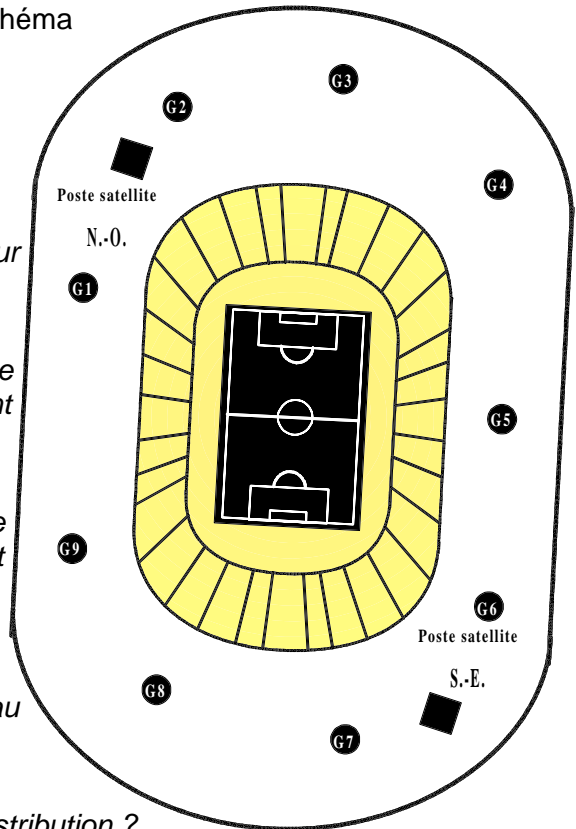
A.4 : A l'aide d'un stylo de couleur verte, **retracez** sur le document réponse Partie A, le circuit correspondant au mode de fonctionnement normal ;

A.5 : Comment **qualifieriez**-vous ces trois structures de distribution ?

A.6 : Lors des retransmissions télévisées des grandes rencontres, la moitié de l'alimentation de l'éclairage de la pelouse est reprise par les groupes dit de "remplacement". Cet éclairage est alimenté par les quatre TGBT "Courants". **Proposez** sur le document réponse Partie A, une position des contacts des disjoncteurs et interrupteurs, depuis les différentes sources, permettant d'assurer le service souhaité sur ces quatre TGBT.

(Ne vous préoccupez pas des autres TGBT)

N.B. : les candidats disposent de deux exemplaires du document réponse Partie A : l'un pour les questions A.2 à A.4 et l'autre pour la question A.6.



PARTIE B

Dimensionnement de câbles et réglages de disjoncteurs

La distribution basse tension issue des deux postes satellites comporte 63 départs (34 du poste Sud-Est et 29 du poste Nord-Ouest). Ces départs sont répartis de la façon suivante :

- 18 départs pour l'alimentation des équipements courants ;
- 27 départs pour l'alimentation des équipements sportifs ;
- 18 départs de sécurité dont 9 pour l'éclairage de sécurité et 9 autres pour le restant des équipements de sécurité.

Les 45 premiers départs cités peuvent être ré alimentés par le circuit dit de remplacement et les 18 autres peuvent être ré alimentés par le circuit dit de sécurité.

Les canalisations sortant des postes satellites, après avoir suivi un cheminement horizontal dans les dessertes intérieures, se répartissent dans 9 colonnes montantes (G1 à G9) desservant les différents niveaux du stade.

Chaque colonne montante comporte 7 canalisations réparties de la façon suivante :

- 2 canalisations réservées aux "équipements courants" c'est-à-dire une alimentation de l'éclairage extérieur (conducteurs aluminium 70, 85, 120 mm²) et une alimentation éclairage et force (canalisations préfabriquées 4 x 630 A) ;
- 3 canalisations réservées aux "équipements sportifs" c'est-à-dire une alimentation de l'éclairage extérieur 1 & 2 (conducteurs aluminium 150 à 2 x 300 mm²) et une alimentation éclairage et force (conducteurs cuivre 50 mm²) ;
- 2 canalisations réservées aux "équipements de sécurité" c'est à dire une alimentation de l'éclairage de sécurité (conducteurs 70 à 150 mm²) et une alimentation installations de sécurité (conducteurs 50 à 120 mm²).

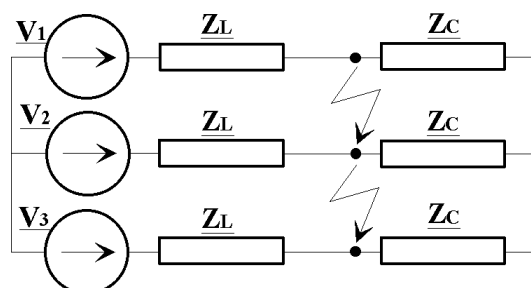
Étude préliminaire au dimensionnement d'une partie de l'installation :

B.1 : Pour un câble unipolaire d'âme conductrice en aluminium et d'une section de 185 mm², **déterminez** sa valeur de résistance pour une température de fonctionnement de 90 °C et une longueur de 210 m. On prendra pour valeur de la résistivité de l'aluminium 28,3 mΩ.mm à 20 °C et pour valeur de coefficient de variation de la résistance avec la température 4,03 . 10⁻³.

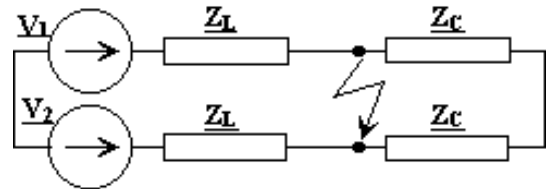
B.2 : A partir du document constructeur présenté sur l'annexe B-1, **déterminez** l'impédance complexe du câble dont les caractéristiques sont données à la question B.1.

Le système de distribution de tension du Stade de France sera considéré comme parfaitement équilibré pour toutes les questions qui suivent :

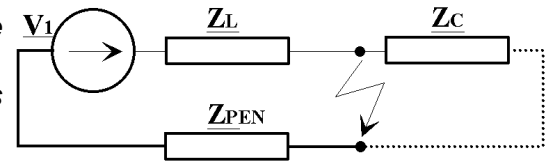
B.3 : A partir du schéma ci-contre, **exprimez** le courant de court-circuit, bouchonné sur les trois phases, (noté I_{cc3}) en régime permanent. Respectez les repères et indices portés sur le schéma.



B.4 : A partir du schéma ci-contre, **exprimez** le courant de court-circuit, bouchonné sur deux phases, (noté I_{cc2}) en régime permanent. Respectez les repères et indices portés sur le schéma.



B.5 : A partir du schéma ci-contre, **exprimez** le courant de court-circuit entre phase et conducteur de protection, (noté I_{ccpen}) en régime permanent. Respectez les repères et indices portés sur le schéma.



B.6 : Comment est assurée la protection des personnes en régime TN ? A quelles conditions doit-on satisfaire pour qu'elle soit effective ? **Rédigez** une réponse concise.

B.7 : L'effet de l'induction mutuelle sur une distribution électrique est donné par le texte informatif de l'annexe B-2. A partir de ce document :

- **précisez** les conséquences sur la valeur d'un courant de court-circuit d'une disposition des câbles en nappes jointives plutôt qu'en trèfle. Quelle solution **préconisez** vous pour une installation en régime TNC ?

B.8 : L'annexe B-3 fait état de coefficients de correction à apporter au choix de section de câbles. **Justifier** simplement la raison d'être de ces trois coefficients.

B.9 : Le graphe présent sur l'annexe B-4 représente les caractéristiques de déclenchements de trois disjoncteurs de l'installation étudiée disposés suivant le croquis qui l'accompagne. Pour les trois cas de courant de court-circuit repérés I_{ccA} , I_{ccB} et I_{ccC} , **précisez** s'il y a sélectivité ou non des protections. **Argumentez** vos réponses.

Dimensionnement d'une partie de la distribution de la colonne G8

L'éclairage de la pelouse est assuré par 454 projecteurs consommant chacun 2 kW (sous 400 V) avec un $\cos \varphi$ de 0,93. Ces projecteurs sont groupés en triangle et leurs caractéristiques électriques de mise en fonctionnement sont décrites par l'annexe C-6.

Les projecteurs sont répartis sur la couronne interne de la toiture suivant une disposition permettant de respecter les contraintes imposées par la fédération internationale de football. Seules les quatre colonnes G1, G3, G6 et G8 permettent l'alimentation de ces projecteurs.

La portion de circuit électrique que l'on se propose d'étudier, a pour source le poste satellite Sud-Est et aboutit à une partie des projecteurs d'éclairage de la pelouse alimentés par la colonne montante G8.

La démarche de calcul est décrite dans le document annexe B-5. Les valeurs de résistivité devront correspondre à une température de l'âme conductrice portée à 90 °C.

($\rho_{cu} = 17,2 \Omega \cdot \text{mm}^2$ à 20°C et $\alpha_{cu} = 3,93 \cdot 10^{-3}$). Le facteur de puissance de toute l'installation est supposé être maintenu à 0,93.

Les caractéristiques de l'installation sont les suivantes :

- La puissance de court-circuit du réseau EDF est estimée à 450 MVA pour un $\cos \phi_{cc}$ de 0,1 sous une tension de livraison de 20 kV. On ne tiendra pas compte dans le calcul de l'impédance des câbles HTA qui alimentent le poste satellite sud-est depuis le poste de livraison Ampère ;
- Le transformateur desservant cette partie de l'installation a pour valeur de puissance apparente 1 600 kVA pour une alimentation primaire de 20 kV. Le document annexe B-6 permet d'obtenir les autres caractéristiques nécessaires aux calculs demandés ;

La description de la partie d'installation à étudier est représentée sur l'annexe B-7. A partir de toutes les indications fournies sur ce document :

Pour des raisons techniques et économiques, on limitera la section des câbles à 300 mm².

B.10 : Déterminez la section du câble repéré C1 en justifiant votre choix. La pose s'effectuera en simple couche sur des chemins de câble perforé. La température ambiante est estimée à 30 °C et la réactance linéique à environ 0,1 mΩ/m.

En vous inspirant du tableau représenté dans l'annexe B-7 :

B.11 : Déterminer la valeur des courants de court-circuit I_{cc3} et I_{cc2} , tels qu'ils sont définis aux questions B.3 et B.4, au point noté A.

B.12 : Déterminez le choix et les réglages du disjoncteur Q1 (positions des potentiomètres I_0 , I_r et I_m). Aidez vous des annexes B-8 à B-10 et **justifiez** vos réponses.

B.13 : Vérifiez que la protection des personnes est assurée en prenant pour section de conducteur PEN une valeur au moins égale à la moitié de la section des conducteurs de phase et en assimilant la réactance du conducteur de protection à celle d'un conducteur de phase (Faites un schéma de principe pour vous aider).

B.14 : Les caractéristiques de la portion de ligne F01 étant fournies, **déterminez** la section du câble C3 pour conserver une chute de tension totale de 6 % au bout de celui-ci. On rappelle que ce câble alimente un quart de la totalité des projecteurs de la pelouse.

B.15 : Déterminez la valeur des courants de court-circuit I_{cc3} et I_{cc2} , tels qu'ils sont définis aux questions B.3 et B.4, au point noté B.

B.16 : Déterminez le choix et les réglages du disjoncteur Q3 (positions des potentiomètres I_0 , I_r et I_m).

B.17 : Vérifiez les limites de sélectivité de la protection assurée par Q3. **Proposez** une solution susceptible de résoudre le problème.

B.18 : Les caractéristiques d'allumage des projecteurs décrites dans l'annexe C-6 montrent un risque de perturbation lors de chaque mise en route. **Décrivez** cette perturbation et **proposez** une solution pour y remédier.

PARTIE C

Étude de l'éclairage de la pelouse

Nombreux sont les dispositifs d'éclairage au sein du stade de France (pelouse, tribunes, verrière, parvis, locaux intérieurs...). L'éclairage de la pelouse a bénéficié d'une attention particulière et a fait l'objet d'études poussées qui en font aujourd'hui une référence mondiale. Cette deuxième partie sera limitée à l'étude de l'éclairage de la pelouse et de la zone située à proximité immédiate (piste d'athlétisme).

C.1 : Questions préliminaires relatives à quelques notions de photométrie

Nota bene : Au cours de cette question, sont évoquées et utilisées certaines grandeurs photométriques fondamentales permettant le dimensionnement d'une installation d'éclairage ainsi que l'interprétation des caractéristiques des sources lumineuses fournies par les fabricants. Une lecture préalable des annexes C-1 et C-2 du cahier « Annexes Partie C » est vivement conseillée !

C.1.1 Sur l'annexe C-3 (cf. figures b et c) on a reproduit deux spectres d'émission l'un correspond à une lampe incandescente à filament de tungstène, l'autre à celui d'un tube fluorescent. *En justifiant votre réponse, indiquez le spectre qui correspond à chacune des sources. Commentez ces deux spectres.*

C.1.2 Dans le spectre électromagnétique, le domaine perceptible par l'œil humain s'étend de 380 nm à 780 nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$), **rappelez** où sont situés le rayonnement ultra-violet d'une part, le rayonnement infrarouge d'autre part. Que peut-on **en déduire** si on sous-alimente une lampe à filament de tungstène ?

C.1.3 Dans un premier temps on assimile l'œil humain à un filtre passe-bande idéal (cf. cahier « Figures et tableaux » : figure 1 courbe « œil idéal ») avec un gabarit tel que l'efficacité lumineuse relative soit égale à :

$$V'_{(\lambda)} = 1 \text{ pour } \lambda_{\text{mini}} \leq \lambda \leq \lambda_{\text{maxi}}$$
$$V'_{(\lambda)} = 0 \text{ pour } \lambda < \lambda_{\text{mini}} \text{ et } \lambda > \lambda_{\text{maxi}}$$

Une source idéale de lumière blanche (celle-ci peut être approchée à l'aide d'une lampe au xénon), émet une puissance d'un watt uniformément répartie sur la totalité du spectre visible (intervalle $[\lambda_{\text{mini}}, \lambda_{\text{maxi}}]$) ; **calculer la densité spectrale** $\frac{d\Phi_e}{d\lambda}$. **Déduisez en la valeur du flux lumineux qui serait émis.**

C.1.4 On considère maintenant l'œil de référence (cf. figure 1 courbe « œil moyen »); sachant que la valeur moyenne de l'efficacité lumineuse relative $V_{(\lambda)}$ sur l'intervalle $[\lambda_{\text{mini}}, \lambda_{\text{maxi}}]$ vaut 0,26385 **montrez qu'avec la source précédente la valeur maximale théorique du flux lumineux utile ne peut dépasser 180 lumens pour un watt émis.**

C.1.5 Une décharge à basse pression dans la vapeur de sodium correspond à une lumière quasi mono-chromatique dont la raie principale, d'une largeur d'environ 5 nm, est

positionnée à 589 nm (cf. figure d de l'annexe C-3). **Donnez** la valeur moyenne locale de $V_{(\lambda)}$ puis celle du flux lumineux émis par un rayonnement toujours égal à un watt.

C.1.6 On considère une lampe de marque OSRAM de référence SOX 180 (cf. annexe C-4), sachant que 60 % de la puissance consommée par la lampe sont perdus en chaleur par convection et que 5 % sont émis par rayonnement dans l'infrarouge court (de 800 nm à 2 000 nm). **Calculez** la puissance émise dans le spectre visible ainsi que le flux lumineux correspondant. **Comparez** cette valeur à celle donnée par le constructeur **et concluez**. Bien que cette notion ne soit pratiquement jamais utilisée par les éclairagistes, **donnez** la valeur du rendement de la lampe.

C.1.7 En se plaçant dans le cadre d'une rencontre sportive (match de football par exemple) l'équipe A portant un maillot de couleur orange, l'équipe B un maillot de couleur bleu, **indiquez** pour quelle raison majeure l'utilisation des lampes étudiées précédemment rendrait délicat le déroulement de la rencontre.

C.2 : Justification du choix de la technologie des lampes

Concernant l'éclairage de la pelouse du Stade de France on peut résumer le cahier des charges par les contraintes énoncées ci-dessous.

a - Niveaux d'éclairagements

a 1 En situation normale et en vertical $E_v = 1\,600$ lux (obtenus avec deux sources d'énergie indépendantes fournissant chacune la moitié de la lumière nécessaire), ce niveau d'éclairage imposé par les fédérations sportives (FIFA) doit permettre des retransmissions par télévision de haute qualité.

a 2 En situation normale et à l'horizontale $E_h \geq 2\,200$ lux.

a 3 En situation dégradée ainsi que pour certains spectacles $E_{v\text{mini}} = 800$ lux obtenus avec une seule source d'énergie.

a 4 Pour les phases d'entraînement $E_v = 300$ lux.

a 5 Pour les périodes d'entretien $E_v = 100$ lux.

b - Qualité de la lumière

b 1 Indice de rendu des couleurs : $IRC_{\text{mini}} \geq 65$ (valeur recommandée ≥ 90).

b 2 Suppression de l'ombre des joueurs sur le terrain.

b 3 Uniformité de l'éclairage : $E_{v\text{mini}}/E_{v\text{maxi}} \geq 0,6$ * $E_{h\text{mini}}/E_{h\text{maxi}} \geq 0,7$.

b 4 Suppression des phénomènes d'éblouissement.

c - Coûts d'exploitation

Coûts liés à la consommation et à la maintenance minimisés.

d - Température de fonctionnement

Les conditions climatiques nécessitent un fonctionnement des sources lumineuses pour un domaine de température compris entre - 20°C et + 40°C.

C.2.1 Justifiez le choix du mode d'alimentation des deux groupes de lampes (contrainte a1).

C.2.2 Expliquez pour quelle(s) raison(s) majeure(s) les lampes à incandescence ne peuvent être retenues pour l'éclairage de l'arène (pelouse et piste d'athlétisme).

C.2.3 Donnez une ébauche de solution permettant d'appréhender les contraintes b2 à b4.

C.2.4 Complétez le document réponse « Partie C - Question C.2.4 » dans lequel sont rassemblées les performances de lampes faisant appel à différentes technologies. Au regard des contraintes techniques et économiques du cahier des charges, **justifiez** complètement le choix de lampes aux halogénures métalliques pour cette application.

C.3 : Calcul du nombre de lampes à installer

C.3.1 Sachant que la surface totale à prendre en considération (pelouse et piste d'athlétisme) est de 13 000 m², **calculez** la valeur du flux lumineux utile pour obtenir, dans les conditions normales, l'éclairage souhaité ($E_h = 2\ 210$ lux).

C.3.2 En prenant un facteur d'utilisation égal à 0,316, **déterminez** le flux réel à fournir ainsi que le nombre total de lampes à installer (modèle HQI - TS 2000/D/S). **Déduisez-en** l'ordre de grandeur de la puissance active totale nécessaire.

C.4 : Analyse et exploitation des caractéristiques des lampes

Nota bene : Le but des questions suivantes est d'utiliser certaines informations techniques afin de valider le dimensionnement des éléments associés aux lampes. Les renseignements techniques relatifs aux lampes « Powerstar HQI » sont disponibles à partir de l'annexe C-5, il est précisé que les valeurs du fabricant sont données pour une tension entre phases de 380 volts qui ne correspond pas exactement à la tension d'utilisation voisine, elle, de 400 volts.

C.4.1 Établissez le schéma de câblage pour une lampe en y faisant apparaître tous les éléments nécessaires au bon fonctionnement. **Expliquez**, en quelques lignes, le rôle et le fonctionnement du circuit d'amorçage.

C.4.2 En raisonnant sur l'évolution de la pression et de la température à l'intérieur de la lampe, **justifiez** la valeur élevée des tensions d'amorçage, à froid puis à chaud. **Précisez** à quelle condition le réamorçage à chaud est possible.

C.4.3 En négligeant pour l'instant le caractère non linéaire du dipôle que constitue la lampe et en admettant que les valeurs données par le fabricant (annexe C-5) sont relatives à un régime sinusoïdal, **déterminez** dans l'ordre et pour le régime nominal permanent ($V_{eff} = 380$ volts) :

- la puissance perdue par effet Joule dans le ballast, P_b
- sa résistance série, r_b

- la valeur efficace de la tension à ses bornes, U_b
- sa réactance, X_b
- la puissance réactive qu'il consomme, Q_b
- le facteur de puissance en l'absence de compensation, f_p .

C.4.4 Afin de relever le facteur de puissance, il est prévu la mise en place d'un condensateur en amont de la platine d'amorçage ; celui-ci devant ramener « $\text{tg}\varphi$ » à 0,4 ; **calculez** :

- la puissance réactive qu'il devra fournir, Q_c
- la valeur de sa capacité, C .
- la valeur de l'intensité du courant prélevé au réseau.

C.4.5 **Comparez** C à la valeur préconisée par le constructeur.

C.4.6 **Identifiez** sur le schéma établi en C.4.1 les deux éléments provoquant une surintensité lors de la mise sous tension.

C.4.7 A partir des annexes C-6 et C-10, **justifiez** le choix d'un fusible de type gG pour la protection de la platine d'amorçage. **Expliquez** pour quelle raison le constructeur a prévu sur cette platine un calibre largement supérieur au courant nominal de régime permanent (environ 6 A).

C.4.8 Durant les tous premiers instants de la mise sous tension d'une platine, l'enveloppe (lieu des maxima positifs) du courant appelé par celle-ci, suit approximativement une expression du type :

$$I_{\text{env}}(t) = I_{\text{max}} \cdot e^{-\delta \cdot t} \text{ avec } I_{\text{max}} = U_{\text{eff}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot C}{l}} \text{ et } \delta = \frac{r}{2 \cdot l}$$

Où U_{eff} est la tension efficace du réseau, C est la capacité de compensation, r et l sont respectivement la résistance et l'inductance totale de la source d'alimentation et des câbles. **Calculez** I_{max} et δ avec $C = 60 \mu\text{F}$, $r = 0,7 \Omega$ et $l = 300 \mu\text{H}$; **validez** alors le calibre retenu (cf. annexe C-10).

C.4.9 Dans les conditions normales d'exploitation, la tension réelle entre phases est voisine de 400 volts. **Déterminez** à l'aide de l'annexe C-7 la puissance réellement consommée par un luminaire (ballast compris).

PARTIE D

Influence des harmoniques de courant générés par les lampes à décharge

La caractéristique dynamique $u_l(i_l)$ d'une lampe présente de très fortes non-linéarités et engendre une déformation du courant appelé au réseau. Cette déformation est susceptible de provoquer un certain nombre de perturbations plus ou moins gênantes, il faut donc impérativement évaluer l'amplitude des harmoniques de courant et les comparer aux valeurs fixées par la norme. Afin de simplifier l'étude on assimilera la tension aux bornes de la lampe à la forme reproduite figure 2, ceci correspond à une tension d'arc constante sur une demi-période avec $U_{arc} = 195$ volts.

D.1 : En régime dynamique, la caractéristique électrique réelle de la lampe est représentée figure 3. En considérant la zone où la résistance dynamique (dul/dil) est négative, **montrez qu'une alimentation en tension conduirait à la destruction de la lampe. Indiquez alors l'autre fonction du ballast.**

D.2 : Pour prédéterminer l'ampleur de la déformation du courant appelé au réseau, on décide d'utiliser la méthode des régimes harmoniques superposés. Dans un souci de simplification, on considère pour l'instant que seule une lampe est connectée au réseau d'alimentation; les autres platines ne sont donc pas sous tension. On admettra de plus que la puissance réactive absorbée par la lampe est nulle (arc « résistif »).

La décomposition en série de Fourier étant rappelée (cf. tableau 1 du feuillet « Figures et tableaux »), **calculez la valeur efficace du fondamental de la tension aux bornes de lampe, U_{l1} . Déduisez des hypothèses précédentes la valeur du déphasage $\varphi_{l1} = [\vec{U}_{l1}, \vec{I}_{l1}]$.**

D.3 : On s'intéresse toujours au régime fondamental ($n = 1$), le schéma correspondant est celui de la figure 5. Par rapport au modèle général suggéré par la figure 4 on y a négligé les imperfections du transformateur (r_s et l_s) ainsi que celle des différents câbles ($r_{c1} \dots r_{c2}$).

Sur le document réponse « Partie D - Question D.3 », mettez en place une représentation de Fresnel en traçant successivement:

- \underline{U}_{l1} (à placer en concordance avec l'origine des phases).
- un arc de cercle de rayon U_1 .
- \underline{U}_{b1} (tension aux bornes du ballast).
- \underline{I}_{c1} (courant dans le condensateur).

Déterminez alors :

- I_{l1} (valeur efficace du courant dans la lampe).
- I_{r1} (valeur efficace du courant en ligne).
- φ_{r1} (déphasage entre U_1 et I_{r1}).

D.4 : **Calculez la puissance P_1 absorbée par la lampe, indiquez pour quelle raison ce résultat était prévisible.**

D.5 : *Déterminez*, vu des points d'alimentation $L_1 - L_2$:

- la puissance réactive absorbée Q_1 ,
- la puissance apparente S_1
- le facteur de puissance fp_1 ($fp_1 = \cos [\vec{U}_1, \vec{I}_{r1}]$)

D.6 : Pour l'étude des harmoniques de courant ($n = 3, 5, 7, 9, \dots$) on propose le schéma équivalent donné figure 6. **Indiquez** les hypothèses et la méthode permettant d'aboutir à ce schéma à partir de celui de la figure 4.

D.7 : On considère l'harmonique de rang 3, **calculez** l'impédance complexe \underline{Z}_r (réseau) et \underline{Z}_c (condensateur) ; **proposez** ainsi une simplification évidente du schéma.

D.8 : **Déterminez** la valeur réduite de l'intensité du courant I_{r3} en pour cent du fondamental I_{r1} .

D.9 : La norme relative aux émissions de courants harmoniques EN 61 000-3-2, fixe pour chaque rang la valeur à ne pas dépasser (cf. tableau 2). **Vérifiez** la compatibilité avec la norme. **Discutez** de l'influence du ballast.

D.10 : On considère maintenant le cas plus réaliste où trois lampes identiques sont connectées au réseau à l'aide d'un couplage triangle. Les résultats d'une simulation effectuée pour les rangs impairs compris entre 3 et 39 ont montré que les courants en ligne multiples de 3 sont tous nuls, **justifiez** à l'aide d'un raisonnement simple la disparition de ces harmoniques.

D.11 : **Expliquez** les risques encourus par l'installation vis à vis des harmoniques de tensions du réseau. **Listez** les solutions aujourd'hui disponibles en indiquant leurs avantages et inconvénients respectifs.