



# **Concours du second degré**

## **Rapport de jury**

---

**Concours : Agrégation externe**

**Section : Sciences industrielles de l'ingénieur  
option ingénierie électrique**

**Session 2014**

Rapport de jury présenté par : Monsieur Claude BERGMANN  
Président de jury

## Table des matières

COMPOSITION DU JURY .....	3
RESULTATS STATISTIQUES DE LA SESSION 2014.....	5
AVANT PROPOS .....	6
1- RAPPORT DU JURY DE L'ÉPREUVE DE SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR .....	7
2- RAPPORT DE JURY DE L'ÉPREUVE DE MODELISATION D'UN SYSTEME, D'UN PROCEDE OU D'UNE ORGANISATION .....	11
3- RAPPORT DE JURY DE L'ÉPREUVE DE CONCEPTION PRELIMINAIRE D'UN SYSTEME, D'UN PROCEDE OU D'UNE ORGANISATION .....	12
4- Épreuve d'admission «Exploitation pédagogique d'une activité pratique relative à l'approche globale d'un système pluritechnique» .....	14
5- Épreuve d'admission « Activité pratique et exploitation pédagogique relatives à l'approche spécialisée d'un système pluritechnique » .....	16
6- Épreuve d'admission « Épreuve sur dossier et agir en fonctionnaire de manière éthique et responsable » .....	20
Annexes	
Éléments de correction de l'épreuve de sciences industrielles de l'ingénieur.....	22
Éléments de correction de l'épreuve de modélisation d'un système, d'un procédé ou d'une organisation.....	34
Éléments de correction de l'épreuve de Conception préliminaire d'un système, d'un procédé ou d'une organisation .....	46
Documents réponses .....	55

## Composition du Jury

Président : BERGMANN Claude, Inspecteur général de l'éducation nationale,

Vice-président : VIOLLIN Samuel, Inspecteur général de l'éducation nationale,

Secrétaire général : GARNIER Eric, DAET de l'académie de Limoges.

Membres du jury :

### Épreuves d'admissibilité

#### Épreuve de sciences industrielles de l'ingénieur

ALIN François, professeur agrégé au lycée Franklin Roosevelt de Reims,  
CORRIEU Pierre Louis, professeur agrégé au lycée Pablo Neruda de Dieppe,  
MERLE Renauld, professeur agrégé au lycée Sainte Geneviève des Bois de Versailles.

#### Modélisation d'un système, d'un procédé ou d'une organisation

DESCHAMPS DE PAILLETTE Thierry, Professeur agrégé au lycée Leonce Vieljeux de La Rochelle,  
LISSORGUES Gaëlle, professeur ESIEE, Cergy Pontoise,  
REYNIER Louis, Professeur agrégé, lycée Cabanis de Brive.

#### Conception préliminaire d'un système, d'un procédé ou d'une organisation

COUTABLE Grégory, professeur agrégé au lycée Alain d'Alençon,  
LEMBEYE Yves, professeur des universités, à l'université de Grenoble,  
TRENTESEAU Jean Noël, Professeur agrégé au lycée Couffignal de Strasbourg.

### Épreuves d'admission

#### Exploitation pédagogique d'une activité pratique relative à l'approche globale d'un système Pluritechnique

ALIN François, professeur agrégé au lycée Franklin Roosevelt de Reims,  
ROBERT Bruno, Professeur des Universités, Université de Reims Champagne-Ardenne,  
CORRIEU Pierre Louis, professeur agrégé au lycée Pablo Neruda de Dieppe,  
MERLE Renauld, professeur agrégé au lycée Sainte Geneviève des Bois de Versailles,  
REYNIER Louis, Professeur agrégé, lycée Cabanis de Brive.

#### Activité pratique et exploitation pédagogique relatives à l'approche spécialisée d'un système pluritechnique

COUTABLE Grégory, professeur agrégé au lycée Alain d'Alençon,  
DESCHAMPS DE PAILLETTE Thierry, Professeur agrégé au lycée Leonce Vieljeux de La Rochelle,  
LEMBEYE Yves, professeur des universités, à l'université de Grenoble,  
LISSORGUES Gaëlle, professeur ESIEE, Cergy Pontoise,  
ROUX Nicolas, Maître de conférences, ENSEEIHT Toulouse, INP de Toulouse.

### **Épreuve sur dossier comportant deux parties**

FLIELLER Damien, Professeur agrégé à l'INSA de Strasbourg,  
OUSTRIC Bernard professeur, agrégé à l'IUT de Perpignan,  
TRENTESEAU Jean Noël, Professeur agrégé au lycée Couffignal de Strasbourg.

Le lycée Roosevelt à Reims a accueilli les réunions préparatoires à cette session 2014 de l'agrégation externe section sciences industrielles de l'ingénieur, pour les trois options, ainsi que les épreuves d'admission qui se sont déroulées dans de très bonnes conditions du 26 juin inclus au 4 juillet 2014 inclus. Les membres du jury adressent de vifs remerciements à monsieur le Proviseur de cet établissement ainsi qu'à l'ensemble de ses collaborateurs pour l'accueil chaleureux qui leur a été réservé.

## RÉSULTATS STATISTIQUES DE LA SESSION 2014

Inscrits	Nombre de postes	Présents aux trois épreuves d'admissibilité	Admissibles	Admis
400	20	157	44	20

Moyenne obtenue par le premier candidat admissible	15,82
Moyenne obtenue par le dernier candidat admissible	7,74
Moyenne obtenue par le premier candidat admis	18,1
Moyenne obtenue par le dernier candidat admis	10,9

### Évolution depuis 2014

Sessions	2001	2002	2003	2004	2005 <sup>1</sup>	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
----------	------	------	------	------	-------------------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

<b>Nombre de postes</b>	47	47	35	18	20	14	14	13	13	13	10	10	15	20
Électronique	20	20	15	8	Sans option									
Électrotechnique	27	27	20	10										
<b>Inscrits</b>														
Électronique	306	260	282	331	Sans option									
Électrotechnique	289	289	277	307										
<b>Total</b>	595	549	559	638	584	568	399	301	273	299	368	367	400	400

<b>Présents<sup>2</sup></b>														
Électronique	156	131	110	128	Sans option									
Électrotechnique	173	150	126	122										
<b>Total</b>	330	281	236	250	208	198	158	107	102	105	122	122	167	157 <sup>2</sup>
<b>Nombre d'admissibles</b>														
Électronique	41	43	31	20	Sans option									
Électrotechnique	50	46	40	25										
<b>Total</b>	91	89	71	45	50	35	35	36	30	32	22	23	28	44

<b>Nombre d'admis</b>														
Électronique	20	20	15	8	Sans option									
Électrotechnique	27	22	20	10										
<b>Total</b>	47	42	35	18	20	14	14	13	9	7	10	10	11	20
<b>% / Nombre de postes</b>	100	89	100	100	100	100	100	100	69,23	53,85	100	100	73	100
<b>Nb de postes non pourvus</b>	0	5	0	0	0	0	0	0	4	5	0	0	4	0
<b>% Admis/présents</b>	14,24	14,95	14,83	7,20	9,61	7,07	8,86	12,15	8,82	6,67	8,20	8,20	6,87	12,7
<b>% Admis/inscrits</b>	7,90	7,65	6,26	2,82	3,42	2,46	3,50	4,32	3,30	2,34	2,72	2,72	2,75	5

<sup>1</sup> Depuis 2005 il s'agit du nombre de candidats ayant composé dans toutes les épreuves écrites.

<sup>2</sup> Seuls les candidats ayant composé dans toutes les épreuves écrites sont considérés comme étant présents.

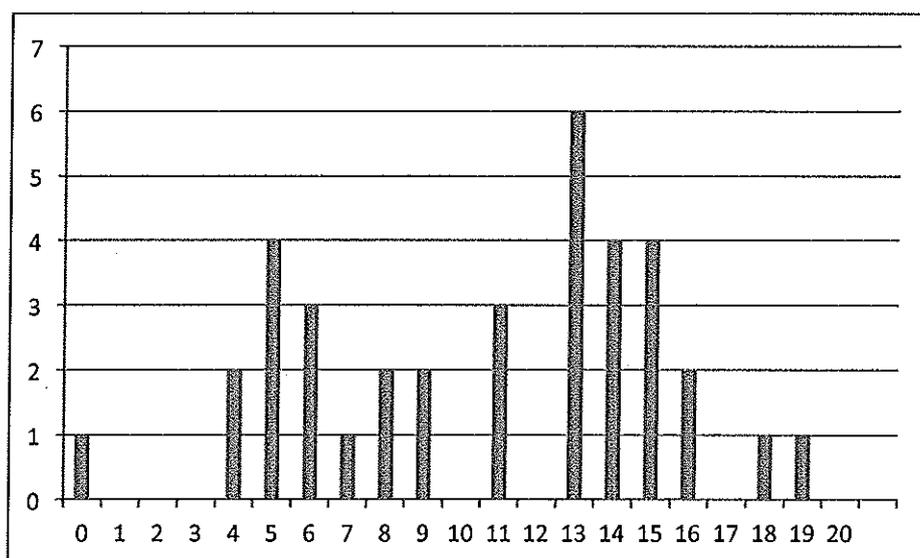
## Avant-propos

Cette session est la deuxième de la nouvelle agrégation externe section sciences industrielles de l'ingénieur à trois options. Les résultats montrent que les formations ne sont pas encore stabilisées mais il était indispensable de persévérer pour faire évoluer le recrutement des professeurs agrégés. L'évolution des statistiques de l'agrégation de Génie Electrique montre que le vivier des candidats bien préparés se réduit d'année en année, il a atteint en 2012 un niveau inquiétant environ 30% des inscrits se présentent et cette année (30 copies présentent une moyenne de 5/20). Il faut également remarquer que la moyenne du meilleur candidat admissible (15,82) est plus faible que lors de la session 2013 (16,11).

**Résultats de l'admissibilité :** La note la plus élevée est de 15,82 et la plus basse de 2,66. La moyenne obtenue est de 7,00/20 avec un écart type de 3,00.

**Résultats de l'admission :** 7 candidats ne se sont pas présentés aux épreuves orales et deux candidats ont démissionné durant les épreuves. 35 candidats ont présenté les 3 épreuves orales, la meilleure notes est de 18,1 et la plus basse : 0. La moyenne sur les 20 candidats admis est de 13,8.

**Fréquence des notes :**



## 1- L'épreuve de sciences industrielles de l'ingénieur

Cette épreuve est commune aux trois options. Les candidats composent sur le même sujet au titre de la même session quelle que soit l'option choisie. Conformément à l'arrêté du 25/11/2011, « cette épreuve a pour but de vérifier que le candidat est capable de mobiliser ses connaissances scientifiques et techniques pour conduire une analyse systémique, élaborer et exploiter les modèles de comportement permettant de quantifier les performances globales et détaillées d'un système des points de vue matière, énergie et information afin de valider tout ou partie de la réponse au besoin exprimé par un cahier des charges. Elle permet de vérifier les compétences d'un candidat à synthétiser ses connaissances pour analyser et modéliser le comportement d'un système pluri-technique automatique ».

La première épreuve d'admissibilité a été traitée de manière linéaire, ce qui montre que l'approche des systèmes pluri technologiques est maintenant bien assimilée par les candidats et que les lauréats 2014 ont des compétences transversales pour aborder la complexité des systèmes actuels et futurs. Il subsiste des lacunes sur des savoirs fondamentaux, en particulier la modélisation des systèmes n'est pas suffisamment maîtrisée. Certains candidats confondent facilement des grandeurs scalaires et des matrices dans les opérations algébriques classiques et l'homogénéité des expressions n'est pas systématiquement vérifiée.

### Présentation du sujet

Le sujet proposé pour cette épreuve de sciences industrielles de l'ingénieur s'appuyait sur la problématique liée à la production d'énergie électrique pour des puissances inférieures à 20kW à l'aide d'éoliennes simples et fiables d'axe vertical particulièrement adaptées à ces besoins.

Le support technique retenu est le système éolien FAIRWIND 10kW, implanté sur un site d'essais dans l'Aude (11), dont le contexte et l'infrastructure permettent de respecter les critères suivants :

- rendement insensible à la direction du vent ;
- rotor éolien simple et fiable ;
- système mécanique réduit sans système d'orientation ;
- hauteur totale de l'installation faible ;
- bruit généré par la vitesse des pales plus faible qu'une éolienne conventionnelle.

Cette épreuve, composée de cinq parties indépendantes, a permis de tester chez les candidats les connaissances et capacités requises dans les champs suivants :

- analyse fonctionnelle des performances globales du système éolien ;
- conversion de l'énergie éolienne en énergie mécanique ;
- conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique ;
- dimensionnement de l'implantation de l'éolienne sur le site ;
- validation du comportement vibratoire du mât ;
- optimisation de la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique ;

## Analyse globale des résultats

La majorité des candidats a abordé l'ensemble des parties du sujet et la progression a été principalement linéaire. La progressivité de la difficulté dans le questionnement a permis d'identifier les candidats les plus performants.

Le jury encourage les futurs candidats à l'agrégation de sciences industrielles de l'ingénieur à poursuivre leur effort de formation afin de développer les compétences transversales de sciences de l'ingénieur.

## Commentaires sur les réponses apportées et conseils aux candidats

En préambule (Questions 1 à 4), il était proposé au candidat une analyse des performances globales de ce mode de production d'énergie électrique. Le travail demandé permettait notamment d'évaluer la durée d'amortissement d'un tel équipement à partir de mesures de l'énergie électrique produite en fonction de la vitesse du vent et du prix de rachat de l'énergie par EDF. Si un bon nombre de candidats a bien traité cette partie du sujet, de trop nombreuses réponses font apparaître des difficultés à exprimer simplement les notions requises. La description SysML en particulier a été bien utilisée par certains candidats pour clarifier les échanges entre les sous-ensembles du système (Question 3).

Le jury recommande aux futurs candidats d'approfondir leur approche concernant la compétitivité des produits et des services notamment sous l'angle de l'économie générale des systèmes (exploitation des données technico-économiques, coûts d'acquisition, de fonctionnement, de maintenance, retour sur investissement, représentation des systèmes complexes).

### **PARTIE 1 : « Modéliser la conversion de l'énergie éolienne en énergie mécanique »**

L'objectif de cette étude (Questions 5 à 13) était d'estimer la puissance mécanique produite à l'entrée de la génératrice synchrone pour une vitesse de vent  $V=10 \text{ ms}^{-1}$  et une fréquence de rotation de l'éolienne de  $70 \text{ tours min}^{-1}$ .

Le jury constate que les phénomènes physiques mis en jeu (aérodynamique, mécanique) et leurs modélisations ne sont pas suffisamment maîtrisés par une grande partie des candidats. De graves confusions faisant intervenir des notions de base sont présentes chez un certain nombre de candidats : force et moment, vitesse et puissances. La géométrie vectorielle pose des problèmes (notamment lors des projections dans une base). L'homogénéité des expressions aurait dû être systématiquement vérifiée.

Le jury recommande aux futurs candidats d'aborder avec la plus grande rigueur toutes les champs disciplinaires de l'épreuve commune et ceci indépendamment de la spécialité propre des candidats.

### **PARTIE 2 : « Modéliser la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique »**

L'objectif de cette étude (Questions 14 à 18) était de valider la structure de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique puis de choisir une loi de commande des convertisseurs de puissance permettant de minimiser les pertes électriques.

Seuls 10% des candidats ont correctement traité cette partie, qui reposait sur la construction et l'exploitation du diagramme de Fresnel relatif à une machine synchrone à aimants permanents simplifiée. Le jury conseille aux futurs candidats de se familiariser avec les modèles des

convertisseurs d'énergie classiques qui équipent la plupart des systèmes, ainsi qu'avec leurs paramètres constructifs et grandeurs réglantes..

### **PARTIE 3 : « Dimensionner l'implantation de l'éolienne sur le site »**

L'objectif de cette partie (Questions 19 à 23) était de valider les conditions de chargement de l'éolienne pour un vent extrême afin d'assurer une implantation convenable de cette dernière sur le site.

Pour cela, deux études étaient proposées :

- validation du mât en termes de contraintes et de déformations subies ;
- vérification du dimensionnement du massif de fondation.

Le jury constate que les phénomènes physiques mis en jeu dans cette partie et leurs modélisations sont mal maîtrisés. La résistance des matériaux est bien souvent mal traitée. Des résultats classiques (l'importance de la composante de la flexion dans le calcul de la contrainte normale par rapport à l'influence de la compression par exemple) ne sont pas connus. Certaines erreurs constatées dans cette partie (inhomogénéité des expressions, incohérence des ordres de grandeur, importance relative des phénomènes, conditions aux limites mal définies) auraient sans doute du être évitées.

Il est rappelé que la modélisation en résistance des matériaux touche à des problématiques communes à l'ensemble des trois spécialités de l'agrégation de sciences industrielles de l'ingénieur.

### **PARTIE 4 : « Valider le comportement vibratoire du mât »**

L'objectif de cette étude (Questions 24 à 31) était de vérifier qu'aucune fréquence propre de vibration du mât n'était sollicitée dans les conditions normales de fonctionnement de l'éolienne.

Le jury constate que la moitié des candidats ont abordé cette partie. Seuls 15% des candidats parviennent à développer une analyse convenable concernant le problème posé.

Certaines erreurs constatées dans cette partie (inhomogénéité des expressions, incohérence des ordres de grandeur, imprécision des systèmes isolés, conditions limites mal définies) auraient sans doute dû être évitées.

Le jury conseille aux futurs candidats d'être plus rigoureux quant aux démarches de modélisation et de résolution de problèmes appliquées aux systèmes complexes.

### **PARTIE 5 : « Optimiser la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique »**

L'objectif de cette étude (Questions 32 à 41) était d'optimiser la production de l'éolienne, en vérifiant s'il est possible d'envisager l'asservissement de position de chacune des pales au cours de la rotation.

Le jury constate que seuls 10% des candidats ont convenablement traité cette partie.

Il est rappelé que la modélisation d'état relève d'une approche moderne de l'automatique, et fait partie des fondamentaux de l'agrégation de sciences industrielles de l'ingénieur et doit, à ce titre, être maîtrisée.

En synthèse finale (Questions 42 à 46), il était proposé au candidat de conclure sur la nature « propre » de ce mode de production d'énergie électrique notamment par la comparaison de

l'émission générée de CO<sub>2</sub> vis-à-vis de l'énergie électrique produite à partir de centrales à charbon, au fuel et au gaz.

Les réponses fournies par les candidats ayant accédé à cette synthèse (15% des candidats) ont été parfaitement rédigées.

### Conseils du jury

Le jury encourage les candidats à traiter toutes les parties du sujet et à montrer qu'ils maîtrisent l'ensemble du domaine des sciences de l'ingénieur. Ceci requiert de leur part la mise en relation des sciences et techniques de l'ingénieur avec leurs outils de description mathématiques et physiques, seule capable d'apporter la clarté exigée dans l'étude des systèmes complexes pluritechniques utilisés dans l'enseignement moderne.

La présentation des copies doit être claire et concise. Il faut indiquer le numéro des questions traitées et la démarche de résolution. Cette dernière doit être exposée avec rigueur, les hypothèses doivent être explicitées clairement et les notations doivent être précises, claires et respecter scrupuleusement celles imposées dans le sujet.

De plus, les expressions littérales doivent être impérativement présentées de la façon suivante :

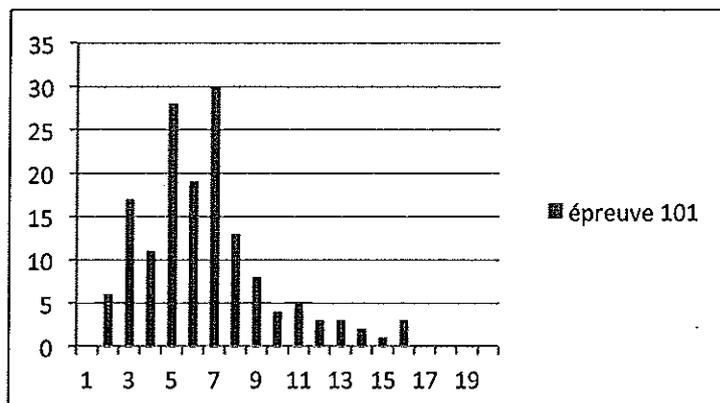
- l'expression littérale, sans aucune application numérique, est présentée encadrée ;
- l'expression est ensuite donnée en remplaçant les termes littéraux par leurs valeurs numériques, dans le même ordre que l'expression littérale ;
- le résultat numérique est ensuite indiqué avec l'unité, encadré.

## Conclusion

Le sujet a été conçu pour permettre aux candidats d'exprimer au mieux leurs compétences dans le cadre de cette nouvelle épreuve transversale. Toutes les questions du sujet ont été abordées par les candidats quelle que soit l'option choisie. Cependant on relève encore un nombre important de candidats visiblement surpris ou mal préparés à cette épreuve et à son approche transversale qui casse les codes disciplinaires traditionnels en mobilisant toutes les dimensions des sciences de l'ingénieur. Le jury conseille aux futurs candidats de porter une attention toute particulière à la préparation de cette épreuve en développant leurs compétences transversales.

## Résultats

161 candidats IE, dont 16 candidats à l'agrégation marocaine, ont composé pour cette épreuve. La moyenne des notes obtenues est de 7/20 et l'écart-type 3/20 avec : 16,74 comme meilleure note et 2,41 comme note la plus basse.



## **2- L'épreuve de modélisation d'un système, d'un procédé ou d'une organisation**

L'épreuve de modélisation d'un système, d'un procédé ou d'une organisation était un peu longue et composée de quatre parties. De façon générale (et surtout pour les parties III et IV), les calculs utilisant des impédances complexes ne sont pas suffisamment maîtrisés. L'homogénéité des résultats est rarement contrôlée, ce qui pourrait éviter de nombreuses erreurs. Ceci n'est pas acceptable à ce niveau de concours !

Le jury recommande toujours aux candidats de lire le sujet en entier car il est constitué de parties totalement indépendantes qui peuvent être traitées dans un ordre quelconque. De plus, le jury apprécie l'utilisation d'un français écrit correct d'un point de vue grammatical, orthographique et syntaxique.

Cette épreuve concerne l'étude d'un dispositif d'implant rétinien destiné à restaurer, au moins partiellement, une activité visuelle dans le cas de certaines pathologies rétinienne. L'approche proposée permettait d'étudier séparément certains blocs fonctionnels (simplifiés) requis lors de la conception de ce type de dispositif médical.

- La première partie (I) s'intéresse à l'acquisition du signal vidéo à l'aide d'une caméra montée sur des lunettes. Le questionnement porte principalement sur la séquence des opérations à effectuer pour acquérir l'image en niveaux de gris et la filtrer.

- La deuxième partie (II) étudie les caractéristiques d'un accéléromètre miniaturisé utilisé pour détecter les mouvements du globe oculaire, et par la suite pouvoir effectuer une correction éventuelle sur les images captées (rotation principalement) pour tenir compte de la position réelle de l'implant dans l'œil. Néanmoins, la correction d'image n'est pas traitée.

- La troisième partie (III) analyse plusieurs aspects de la liaison nécessaire entre les lunettes et l'implant, d'une part le couplage inductif permettant de communiquer avec l'implant, et d'autre part un système d'amplification des données transmises du côté de l'implant (cas proposé non conforme à la réalité par soucis de simplification et de confidentialité industrielle).

- La quatrième et dernière partie traite de la partie implantée, avec la modélisation de l'interface électrodes métalliques /tissus rétiens, suivie du principe de conception d'un neuro-stimulateur intégré organisé autour d'un convertisseur numérique-analogique et de dispositifs à miroirs de courants.

La partie (I) a été abordée par 85% des candidats. 32% des candidats ont obtenu au moins le tiers des points affectés à cette partie. Cette partie faisait référence aux outils de représentation UML et SysML, mais peu de candidats maîtrisent correctement le vocabulaire associé aux différents diagrammes ainsi que le formalisme graphique. Des lacunes conceptuelles et méthodologiques sont apparues dans le formalisme algorithmique et la connaissance du langage C, pourtant indispensables à l'ingénierie des systèmes électroniques modernes. On peut également regretter que les concepts et les technologies de conversion analogique-numérique soient mal connus. Par exemple, seuls 43% des candidats ont traité la question sur le calcul du quantum du CAN, avec 18% de bonnes réponses. 80% des candidats ont abordé la partie (II). 35% des candidats ont obtenu le tiers des points affectés à cette partie et 5% plus des 2/3 des points. L'extraction d'informations à partir des notices techniques de l'accéléromètre est moyennement maîtrisée, tout comme les conversions de format binaire-hexadécimal. Par contre, les questions portant sur l'étalonnage et l'utilisation des données mesurées ont globalement été bien traitées.

Pour la partie (III), 86% des candidats ont abordé l'ensemble mais seulement 31% ont traité la sous-partie A sur la modélisation de la liaison lunettes-implant à l'aide d'un transformateur équivalent. Les

équations plutôt classiques du transformateur se sont révélées assez mal connues. La seconde sous-partie a été globalement mieux traitée, bien que les ordres de grandeurs ainsi que la cohérence des résultats fassent rarement l'objet d'une analyse critique. L'analyse des documentations techniques relatives à l'amplificateur opérationnel ont fait apparaître des lacunes sur les notions de base (exemple : gain en boucle ouverte ; stabilité), et peu de candidats font le lien entre les calculs demandés et la technologie. Néanmoins, 23% des candidats ont obtenu au moins la moitié des points affectés à cette partie.

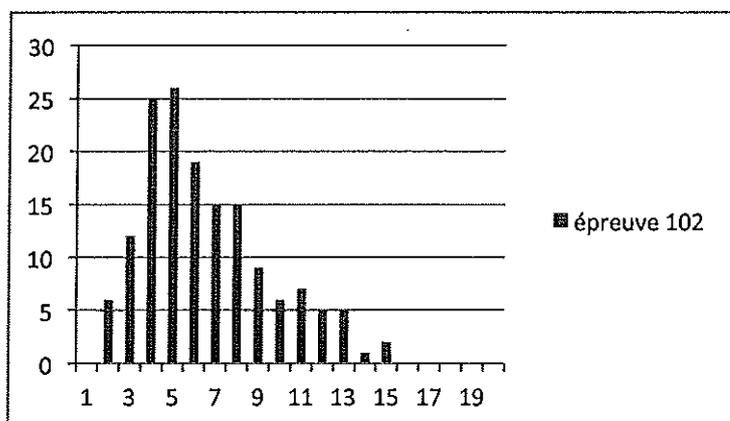
Enfin, la partie (IV) a été abordée par environ 86% des candidats, qui ont donc bien lu le sujet jusqu'à la fin, et 27% ont obtenu au moins le tiers des points affectés à cette partie. Les questions autour du diagramme de Nyquist n'ont été correctement traitées que par 15% des candidats, en partie à cause d'une faible maîtrise calculatoire avec les nombres complexes. Et moins de 4% ont abordé les questions relatives aux miroirs de courant à transistors MOSFET.

De façon générale (et surtout pour les parties III et IV), les calculs utilisant des impédances complexes ne sont pas suffisamment maîtrisés. L'homogénéité des résultats est rarement contrôlée, ce qui pourtant éviterait de nombreuses erreurs. Ceci n'est pas acceptable à ce niveau de concours !

Le jury recommandera toujours aux candidats de lire le sujet en entier car il est constitué de parties totalement indépendantes qui peuvent être traitées dans un ordre quelconque. De plus, le jury appréciera toujours l'utilisation d'un français écrit correct d'un point de vue grammatical, orthographique et syntaxique.

#### Résultats :

155 candidats ont composé cette épreuve, la meilleure note est de 15,64 et la plus basse : 2,60, la moyenne obtenue est de 7,00 avec un écart type de 3,00.



### 3- L'épreuve de conception préliminaire d'un système, d'un procédé ou d'une organisation

L'épreuve de conception préliminaire d'un système, d'un procédé ou d'une organisation a été conçue de manière graduelle dans la difficulté avec quatre parties complètement indépendantes. L'épreuve est longue ; aussi les candidats doivent s'entraîner aux techniques de composition sur une durée équivalente afin de traiter une part importante du sujet. Il leur est aussi recommandé de prendre connaissance de l'intégralité du sujet afin de pouvoir composer en fonction de leurs compétences. On constate des lacunes importantes aussi bien dans les notions de base de l'EEA que dans l'utilisation des outils mathématiques usuels : il est impératif de réviser l'ensemble de ces notions avant de se

présenter aux épreuves. L'épreuve 2014 comportait 4 parties indépendantes et portait sur la conversion d'énergie photovoltaïque intégrée à un bâtiment à énergie positive.

La première partie était consacrée, après une mise situation sur un cas réel, à l'étude des caractéristiques des panneaux photovoltaïques. L'influence des grandeurs externes (ensoleillement et température) sur la puissance électrique générée conduisait à un cas concret de mise en œuvre d'une installation, en posant le problème des différentes possibilités de raccordement à un onduleur industriel. Cette partie, relativement simple permettait aux candidats de montrer leur connaissance sur ce type de générateur et leur capacité à exploiter une documentation technique. Il était ensuite proposé de modéliser les cellules photovoltaïques afin de comprendre les choix d'organisation de ces cellules au sein d'un panneau et de justifier l'implantation de diodes de « by-pass ».

Cette partie a été traitée par la totalité des candidats. Toutefois il est à noter que peu ont été en mesure de la traiter dans son intégralité même si les concepts proposés étaient simples et ne demandaient que très peu de prérequis. On constate des lacunes importantes dans la validation et la justification des résultats.

*97,4% des candidats ont obtenu des points sur cette partie ; 11,7% d'entre eux ont eu plus de la moitié des points du barème.*

La deuxième partie, plus classique, portait sur l'étude d'un onduleur photovoltaïque : le dimensionnement des composants et l'évaluation des pertes dans les deux étages de puissance de cet onduleur (hacheur élévateur en entrée et onduleur MLI en sortie) conduisaient à la détermination de son rendement. La plupart des calculs s'appuyaient d'une part sur le tracé des formes d'ondes de signaux de courants et de tensions et d'autre part sur l'exploitation de fiches techniques fournies par les fabricants de composants.

Cette partie très classique dans sa forme comme dans ses attentes n'a été, à la grande surprise des membres du jury, que très partiellement traitée. On est pourtant ici dans le cœur des connaissances attendues pour un agrégé SII :

- *le fonctionnement d'un onduleur avec une commande en Modulation de Largeur d'Impulsion de type « sinus - triangle » se limite pour de trop nombreux candidats au seul tracé de sa tension sortie. L'étude d'un même montage avec deux échelles de temps différentes (celle associée à la haute fréquence de découpage et celle associée à la basse fréquence de l'onde de sortie) nécessite de la rigueur aussi bien dans le raisonnement que dans les notations, trop peu souvent respectées ou incohérentes;*
- *l'identification d'une structure « classique », en l'occurrence celle d'un hacheur élévateur, sur chaque entrée MPPT de l'onduleur a fait défaut à de nombreux candidats ;*
- *la lecture d'une fiche technique (« data sheet ») nécessite rigueur et concentration, une simple lecture en diagonale ne suffit pas. Les candidats devraient être coutumiers de cet exercice.*

*31,8% des candidats ont obtenus des points sur cette partie ; aucun n'a obtenu plus de la moitié des points du barème.*

La troisième partie était consacrée au stockage électrochimique. L'étude portait sur l'analyse de la structure d'un pack batterie incluant la problématique de l'équilibrage de charge, d'abord passif puis actif.

Peu de candidats ont abordé correctement cette partie ; les concepts étudiés ne semblent pas avoir été bien compris. On note ici une difficulté pour les candidats de se confronter à des dispositifs nouveaux et d'être capables, en partant de règles simples, de construire une analyse structurée.

64,3% des candidats ont obtenus des points sur cette partie ; 3,3% d'entre eux ont eu plus de la moitié des points du barème.

La quatrième partie proposait d'étudier une structure réversible de type Dual Active Bridge pouvant être mise en œuvre dans un problème d'équilibrage actif. Cette partie consacrée à une configuration encore assez peu classique proposait d'en comprendre les propriétés en reprenant de façon très progressive les différents points clés de son principe de fonctionnement.

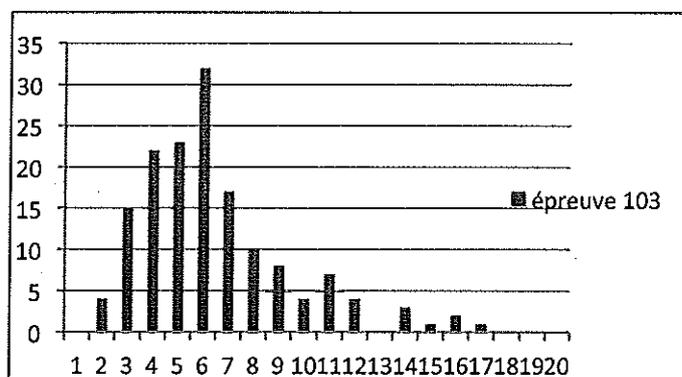
Très peu de candidats ont été jusqu'à cette partie dans l'exploration du sujet. On peut malgré tout constater, dans cette partie comme dans la précédente des difficultés tant dans la modélisation des systèmes que dans la résolution d'équations, y compris celles de base. 51,3% des candidats ont obtenus des points sur cette partie ; 2,0% d'entre eux ont eu plus de la moitié des points du barème.

#### Recommandations aux candidats :

L'épreuve est longue ; aussi les candidats doivent s'entraîner aux techniques de composition sur une durée équivalente afin de traiter une part importante du sujet. Il leur est aussi recommandé de prendre connaissance de l'intégralité du sujet afin de pouvoir composer en fonction de leurs compétences. On constate des lacunes importantes aussi bien dans les notions de base de l'EEA que dans l'utilisation des outils mathématiques usuels : il est impératif de réviser l'ensemble de ces notions avant de se présenter aux épreuves.

#### Résultats :

154 candidats ont composé cette épreuve, la meilleure note est de 17,87 et la plus basse : 2,66, la moyenne obtenue est de 7,00 avec un écart type de 3,00.



#### 4- La première épreuve d'admission « Exploitation pédagogique d'une activité pratique relative à l'approche globale d'un système Pluritechnique »

Cette année encore, quelques candidats ont parfaitement bien réussi cette épreuve, faisant montre à la fois de solides compétences disciplinaires et d'une réflexion pédagogique tout à fait encourageante pour la suite de leur carrière.

Pour autant un nombre encore trop important d'admissibles s'est trouvé en difficulté face à cette épreuve généralement à cause d'une méconnaissance ou d'une préparation inadaptée de celle-ci.

C'est pourquoi, au vu des différentes prestations observées, le jury renouvelle ses recommandations, qui peuvent être synthétisées comme suit :

4.1- De nombreux candidats éprouvent des difficultés face au caractère pluri technique des systèmes. Des lacunes se manifestent non seulement lorsqu'il s'agit de comprendre et modéliser le fonctionnement de certains éléments d'un domaine technologique particulier, mais aussi pour modéliser efficacement les liens entre domaines technologiques différents. Les méthodes de modélisation sont souvent incohérentes dans la mesure où elles exploitent des modèles inappropriés, ou au contraire excessivement détaillées sur un élément particulier du système. Certains candidats n'exploitent qu'un seul champ disciplinaire, alors que tous les supports proposés sont pluri-techniques. Certaines modélisations, même lorsqu'elles ne sont pas fondamentalement erronées, décrivent des comportements peu pertinents eu égard aux fonctionnalités à étudier.

Il convient donc d'augmenter les connaissances scientifiques et techniques des éléments et des structures dans tous les champs technologiques des sciences de l'ingénieur, afin de décoder efficacement l'architecture d'un système et les raisons de son comportement.

Il faut aussi améliorer les capacités à identifier et décrire les comportements significatifs des systèmes à modéliser et utiliser à cette fin les logiciels de simulation des systèmes dynamiques.

Les candidats doivent s'attacher à suivre une démarche à la fois scientifique et pragmatique, afin de relier efficacement les éléments structurels aux connaissances théoriques, de choisir le niveau de modélisation requis et d'élaborer un protocole d'étude rigoureux.

4.2- Concernant la démarche pédagogique demandée dans cette épreuve, il a été également relevé des difficultés pour extraire du système et du référentiel de formation une stratégie globale adaptée à l'enseignement visé.

Une bonne capacité à utiliser des outils de description systémique (e.g. SysML) permettrait d'élaborer à destination des élèves des descriptions claires des systèmes ; de telles descriptions sont un outil pour faire le lien entre :

- la description systémique et les modèles comportementaux d'une part;
- la description systémique et des centres d'intérêt compatibles avec les référentiels de formation d'autre part.

Cette approche devrait se concrétiser entre autres par la formulation d'une problématique qui soit significative pour les élèves.

Les candidats doivent s'entraîner à extraire d'un système des activités bien choisies à proposer à des élèves, en élaborant un scénario réaliste et détaillé de la séquence et d'une ou plusieurs séances constitutives.

4.3- Le format de l'exposé oral est mal maîtrisé

Les 40 minutes de l'épreuve peuvent être, sans que ceci soit un dogme, découpées comme suit : 5 minutes allouées à la présentation du système, 15 minutes à la présentation des investigations expérimentales et 20 minutes au développement détaillé de la séquence pédagogique.

4.4- Conseils pour la préparation de l'épreuve

Pour que les futurs candidats puissent aborder cette épreuve de l'agrégation de Sciences Industrielles de l'Ingénieur Option Ingénierie Électrique dans des conditions optimales, il est précisé que chaque séquence pédagogique présentée doit être reliée à un contexte cohérent et construite à partir d'objectifs d'enseignement précis. Le lien entre l'exploitation technique du système et les activités proposées aux élèves/étudiants doit être établi de la manière la plus claire. Des données objectives

doivent être correctement identifiées dans le référentiel de formation ciblé par le sujet, afin de construire solidement la séquence et ses séances constitutives.

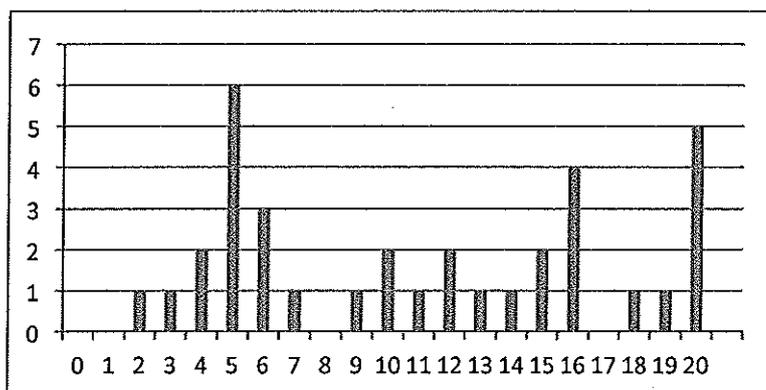
Un exposé de 40 minutes ne s'improvise pas et il est nécessaire de se préparer à construire un plan structuré d'intervention bien en amont des épreuves orales.

### Résultats

35 candidats ont composé pour cette première épreuve d'admission. L'épreuve est constituée de deux parties, une première partie concerne l'exploitation pédagogique d'un système pluritechnique et la deuxième partie concerne l'exploitation des mesures effectuées et la réalisation de la séquence pédagogique. Les moyennes des notes obtenues sont de 11,4/20 avec un écart type de 2,66 pour la première partie et de 10,1/20 avec un écart type de 2,69.

La meilleure note : 20, la plus basse note 1,8.

Fréquence des notes :



## 5- La deuxième épreuve d'admission « Activité pratique et exploitation pédagogique relatives à l'approche spécialisée d'un système pluritechnique »

### Définition de l'épreuve

Cette épreuve a pour objectif d'évaluer l'aptitude du candidat à :

- mettre en œuvre des matériels ou équipements, associés si besoin à des systèmes informatiques de pilotage, de traitement, de simulation, de représentation ;
- conduire une expérimentation, une analyse de fonctionnement d'une solution, d'un procédé, d'un processus, dans la spécialité du concours, afin d'analyser et vérifier les performances d'un système technique ;
- exploiter les résultats obtenus et formuler des conclusions ;
- concevoir et organiser une séquence de formation pour un objectif pédagogique imposé à un niveau de classe donné, et présenter de manière détaillée un ou plusieurs points-clefs des séances de formation constitutives. Cette séquence prend appui sur les investigations et les analyses effectuées au préalable par le candidat au cours d'activités pratiques relatives à un système technique.

### Les supports utilisés pour la session 2014

Les supports proposés pour l'activité pratique de la session 2014 permettaient, à partir d'une analyse systémique globale, l'analyse d'un problème technique particulier, relatif à l'option Ingénierie Électrique de l'agrégation.

### **Système d'éclairage communicant par bus de terrain.**

Le sujet portait sur l'étude d'un système composé de ballast à tubes fluorescents, gradables, commandés par un bus de terrain dédié aux applications d'éclairage. Le système fourni aux candidats permettait de mettre en évidence les spécificités du bus de terrain utilisé. Il était ensuite demandé au candidat de proposer un plan de séquence pédagogique de niveau Bac + 2.

### **Convertisseur électromécanique pour éolienne**

Le sujet s'intéressait à la conversion d'énergie dans le cadre d'une éolienne travaillant à vitesse variable. Outre la prise en main du système et la compréhension de sa commande réalisée sous LabView, il était demandé au candidat d'évaluer les performances de l'ensemble et de maîtriser les paramètres de réglage.

### **Utilisation d'une plateforme robotique pédagogique de recherche et développement**

Au travers d'une démarche d'appropriation progressive des fonctionnalités du système et de son organisation matérielle et logicielle, il était demandé au candidat de modifier une partie d'un programme et de l'implémenter dans la carte mère du robot. La démarche mise en œuvre dans la partie pratique de l'épreuve permettait ainsi d'appréhender la notion de « projet » et de programmation orientée objet en informatique industrielle.

### **Traitement numérique du signal appliqué au traitement d'image**

Le sujet s'intéressait au traitement numérique du signal, en particulier aux filtres numériques, et s'appuyait sur l'acquisition et le traitement d'images captées à l'aide d'une caméra numérique (dans le cas d'images planétaires ou tout autre type d'application d'imagerie numérique).

### **Micro centrale hydraulique**

Le sujet portait sur l'étude d'une micro centrale hydraulique raccordée au réseau de distribution. Après une découverte progressive du fonctionnement du système à travers une problématique énergétique, le candidat devait montrer les difficultés d'exploitation de ce type de centrale en mode isolée.

### **Système photovoltaïque**

Le sujet portait sur l'étude d'un système photovoltaïque destiné à être installé sur un site isolé. Après une découverte du comportement des panneaux photovoltaïques et de leur association, le candidat devait s'intéresser à l'optimisation de la production de ce type de système. Il était ensuite demandé au candidat de proposer un plan de séquence pédagogique de niveau Bac + 2.

## **Le déroulement de l'épreuve**

La durée totale de l'épreuve est de six heures (activités pratiques : quatre heures ; préparation de l'exposé : une heure ; exposé : quarante minutes maximum ; entretien : vingt minutes maximum). Dix points sont attribués à la première partie liée aux activités pratiques. Dix points sont attribués à la seconde partie liée à la leçon. L'épreuve est coefficient 2.

La proposition pédagogique attendue, directement liée aux activités pratiques réalisées, est relative aux enseignements technologiques de spécialité du cycle terminal "sciences et technologies de l'industrie et du développement durable (STI2D)" du lycée et des référentiels et programmes de BTS et DUT relatifs aux champs couverts par l'option Ingénierie électrique de l'agrégation.

## **Tirage au sort**

Un tirage au sort en début de séance permettait d'affecter un poste de travail au candidat, parmi les six préparés en amont par les membres du jury.

## **Activités pratiques**

Durant les quatre heures passées dans le laboratoire, le candidat est accompagné par un membre du jury, chargé de le guider dans la mise en oeuvre du système et dans ses choix matériels et/ou logiciels.

## **Préparation de l'exposé**

Après les quatre heures d'activités pratiques, le candidat est accompagné en salle de préparation. Il y reste une heure et dispose, pour préparer son exposé, de l'ordinateur avec lequel il a conduit ses activités pratiques au cours de la première partie de l'épreuve.

## **Présentation orale**

Le candidat est amené au cours de sa présentation orale à expliciter sa démarche méthodologique, à mettre en évidence les informations, données et résultats issus des investigations conduites au cours des activités pratiques qui lui ont permis de construire sa proposition pédagogique.

## **Entretien de 20 minutes**

Au cours de l'entretien, le candidat est conduit plus particulièrement à préciser certains points de sa présentation ainsi qu'à expliquer et justifier les choix de nature didactique et pédagogique qu'il a opérés dans la construction de la séquence de formation présentée.

## **L'évaluation**

Chaque candidat est évalué à partir d'une grille de compétences identique pour tous les sujets. Cet outil, construit en trois parties (activités pratiques, soutenance et entretien), permet d'évaluer équitablement tous les candidats, selon les mêmes compétences et indicateurs. La première partie fournit une note sur 10 points. L'association de la deuxième et de la troisième partie fournit aussi une note sur 10 points.

## **Les attentes du jury**

### **Partie pratique**

Le jury attend d'un candidat à l'agrégation qu'il sache clairement identifier les objectifs de l'activité pratique proposée. Même si le candidat n'est pas expert dans le domaine sur lequel porte le sujet tiré au sort, les activités sont construites de façon progressives et abordables à un niveau BTS ou DUT.

L'utilisation de logiciels de simulation multiphysique et de création d'instruments virtuels (tels que Matlab-Simulink, Scilab, OpenModelica, LabView,...) ne peut plus être ignorée d'un candidat à l'agrégation de sciences industrielles de l'ingénieur.

En outre, l'option ingénierie électrique de l'agrégation impose la maîtrise des concepts de développement logiciel à partir d'un environnement professionnel. La connaissance d'un ou plusieurs langages structurés (compilés ou interprétés) est vivement recommandée. Les concepts de programmation orientée objet ne peuvent plus être ignorés d'un candidat à l'agrégation.

Il est regrettable qu'en 2014 certains candidats ne maîtrisent pas parfaitement l'utilisation d'appareils de mesures devenus classiques (oscilloscopes numériques, analyseurs de réseau,...).

Outre les fondements de l'ingénierie électrique, les diagrammes les plus utilisés de la modélisation SysML (ou UML) doivent obligatoirement être connus par tous les candidats.

Cette première partie de l'épreuve permet au jury d'évaluer les compétences du candidat dans la mise en œuvre d'un système technique, mais aussi dans sa maîtrise des concepts fondamentaux, du domaine de l'ingénierie électrique qu'il permet d'aborder.

### **Exposé et entretien**

Le candidat dispose de 40 minutes pour présenter la séquence pédagogique qu'il souhaiterait construire à partir des activités pratiques menées lors de la première partie de l'épreuve. Beaucoup trop de candidats n'exploitent pas correctement la totalité du temps dont ils disposent. Une trop grande partie des candidats s'arrête après moins de 10 minutes d'exposé.

La présentation d'une séquence pédagogique impose une définition correcte de ses objectifs, au regard du programme ou du référentiel de formation précisé dans le sujet de l'épreuve. La définition des prérequis ne doit pas s'arrêter à une liste plus ou moins exhaustive d'unités d'enseignement ou de savoirs.

Les modalités d'évaluation mises en œuvre en cours et en fin de séance doivent être définies précisément.

Il est impératif qu'un lien argumenté existe entre les activités pratiques mises en œuvre dans la première partie de l'épreuve et la séquence pédagogique proposée. Il n'est pas envisageable que la séquence pédagogique proposée soit une recopie, plus ou moins fidèle, de la première partie de l'épreuve.

### **Conseils pour la préparation de l'épreuve**

Pour aborder cette épreuve dans des conditions optimales, il est conseillé aux futurs candidats à l'agrégation de Sciences Industrielle de l'Ingénieur – Option Ingénierie Électrique de :

- maîtriser les outils de modélisation SysML et UML ;
- maîtriser l'utilisation d'outils de développement logiciel ;
- connaître le programme d'Enseignement Technologique Transversal du baccalauréat STI2D et les programmes des spécialités Systèmes d'Information et Numérique et Énergie et Environnement ;
- connaître le programme de sciences de l'ingénieur du baccalauréat scientifique ;
- avoir pris connaissance des référentiels des BTS Systèmes électroniques, Informatique et Réseaux pour l'Industrie et les Services techniques et Électrotechnique ;
- avoir pris connaissance des programmes du DUT GEII.

Il est important de préciser que chaque séquence pédagogique présentée doit être contextualisée et construite à partir d'objectifs bien précis, avec des prérequis correctement identifiés dans le programme ou le référentiel de formation ciblé par le sujet.

Enfin, rappelons qu'un exposé de 40 minutes ne s'improvise pas et qu'il est nécessaire de se préparer à construire un plan structure d'intervention bien en amont des épreuves orales.

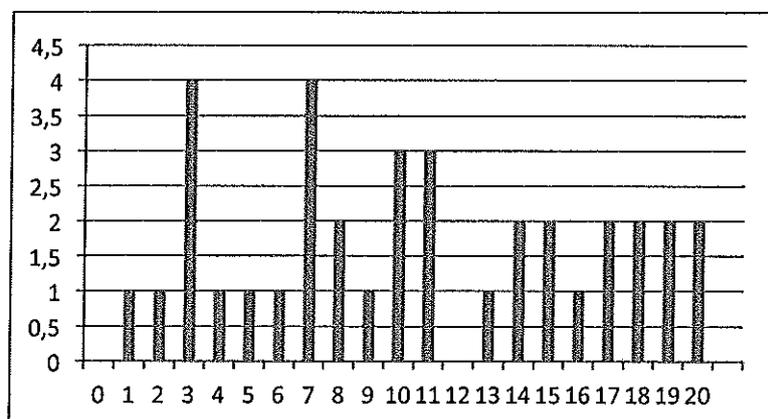
### **Résultats**

36 candidats ont composé pour cette deuxième épreuve d'admission. L'épreuve est constituée de deux parties, une première partie concerne l'exploitation pédagogique d'un système « courant faible »

ou « courant fort » et la deuxième partie concerne l'exploitation des mesures effectuées et la réalisation de la séquence pédagogique. Les moyennes des notes obtenues sont de 11,4/20 avec un écart type de 2,32 pour la première partie et de 9,2/20 avec un écart type de 2,95.

La meilleure note : 20, la plus basse note 0,9.

Fréquence des notes :



## 6- L'épreuve sur dossier comporte deux parties

Arrêté du 25 novembre 2011 : « L'épreuve a pour but de vérifier que le candidat est capable de rechercher les supports de son enseignement dans le milieu économique et d'en extraire des exploitations pertinentes pour son enseignement en collège ou en lycée...

Le dossier présenté par le candidat est relatif à un système technique dont la dominante est choisie par le candidat. Son authenticité et son actualité sont des éléments décisifs. »

Le jury apprécie qu'un réel partenariat s'engage entre le candidat et une entreprise ou un laboratoire, préfiguration de la qualité des partenariats que pourra nouer l'enseignant dans ses activités. Il attend qu'une problématique soit précisée autour d'un système pluritechnique qui donne lieu à une analyse de son fonctionnement et de ses performances. Il apprécie que le candidat ait proposé une réelle contribution à la problématique. Dans l'hypothèse où le partenariat se serait déroulé dans le cadre d'un stage, le candidat doit faire l'effort de comparer les solutions retenues par rapport à l'état de l'art du domaine. Toutefois, il ne s'agit pas de s'inscrire dans une activité de recherche et développement sur un système encore inexistant, mais de s'approprier les contenus scientifiques et technologiques d'un système réel pour construire des exploitations pédagogiques originales et innovantes.

Ces exploitations pédagogiques doivent être en rapport avec la fonction principale du système choisi. Quelques candidats n'ont pas su exploiter complètement la richesse des systèmes choisis, en ne faisant qu'une extraction très parcellaire d'une fonction secondaire.

Le dossier est une synthèse personnelle qui s'appuie sur des documents divers, notamment issus du partenariat. Il doit obligatoirement respecter les règles de citation des sources. Des développements scientifiques doivent être apportés. Ils doivent se situer au niveau du concours et ne pas se restreindre au niveau des élèves visés par l'application pédagogique. A travers ces développements, le candidat montre sa maîtrise des outils numériques de simulation en rapport avec le sujet.

L'exploitation pédagogique doit être développée en précisant les référentiels choisis, les compétences et connaissances associées et l'organisation matérielle des activités d'enseignement. La séquence proposée doit s'inscrire dans une progression générale. Le jury apprécie que la séquence puisse se faire avec des équipements d'un coût compatible avec le budget d'un EPLE

### Épreuve « agir en fonctionnaire de manière éthique et responsable »

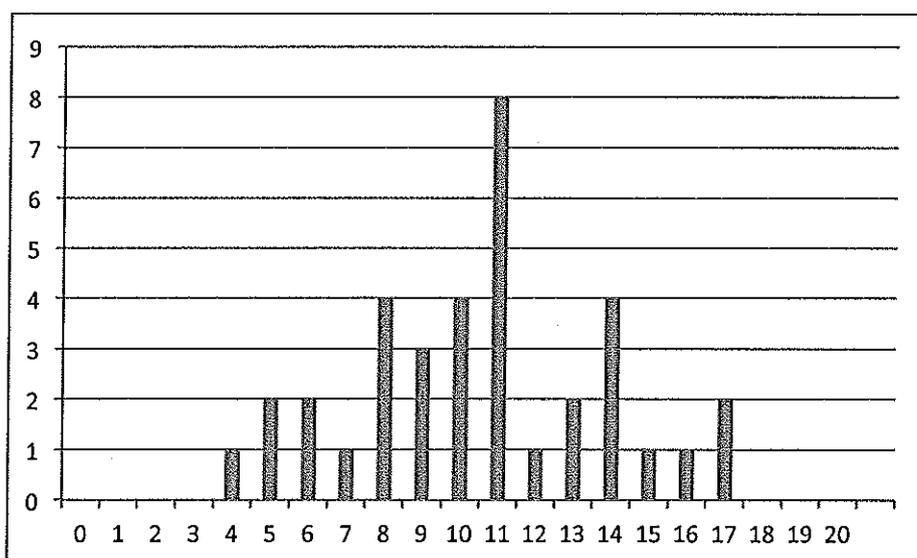
Les questions posées concernent des situations concrètes qu'un enseignant est amené à rencontrer dans l'exercice de son métier. Le candidat doit se projeter dans cette problématique et proposer des solutions concrètes et pragmatiques. Il doit aussi être capable de trouver les textes réglementaires pertinents et de s'y appuyer pour construire une argumentation.

### Résultats

36 candidats ont composé pour cette deuxième épreuve d'admission. L'épreuve est constituée de deux parties, une première partie concerne l'exploitation pédagogique d'un dossier technique réalisé par le candidat et la deuxième partie porte sur les connaissances du candidat concernant l'institution. Les moyennes des notes obtenues sont de 10,1/20 avec un écart type de 2,68

La meilleure note : 20, la plus basse note 3,5.

Fréquence des notes :



# Éléments de correction de l'épreuve de sciences industrielles de l'ingénieur

## Question 1

Réponse : 36242 kWh

Vitesse du vent en m/s	Puissance moyenne (W)	Nombre de Mesures	% du Temps	Durée (h) sur 1 an	Énergie produite en kWh
1	0	200	0,9 %	76,6	0
2	0	600	2,6 %	229,8	0
3	231	1750	7,7 %	670,3	155
4	709	2500	10,9 %	957,6	679
5	1535	3300	14,4 %	1264,0	1940
6	2873	3700	16,2 %	1417,2	4072
7	4384	3210	14,0 %	1229,5	5390
8	5952	2500	10,9 %	957,6	5700
9	8015	1800	7,9 %	689,5	5526
10	9823	1250	5,5 %	478,8	4703
11	10112	850	3,7 %	325,6	3292
12	10304	600	2,6 %	229,8	2368
13	10512	260	1,1 %	99,6	1047
14	10305	200	0,9 %	76,6	789
15	10096	150	0,7 %	57,5	580
		<b>22870</b>			<b>36242</b>

## Question 2

Durée annuelle de fonctionnement :  $D = \frac{36242 \text{ kWh}}{10 \text{ kW}} = 3624 \text{ h}$ .

Recettes attendues pour les 10 premières années :  $R = 36242 \times 0,082 - 500 = 2472 \text{ euros/an}$

Recettes attendues pour les 5 années suivantes :  $R = 36242 \times 0,028 - 500 = 515 \text{ euros/an}$

Durée d'amortissement : 26 500 € = 10 ans x 2471,84 € + 3,46 ans x 514,78 soit 13,5 années.

## Question 3

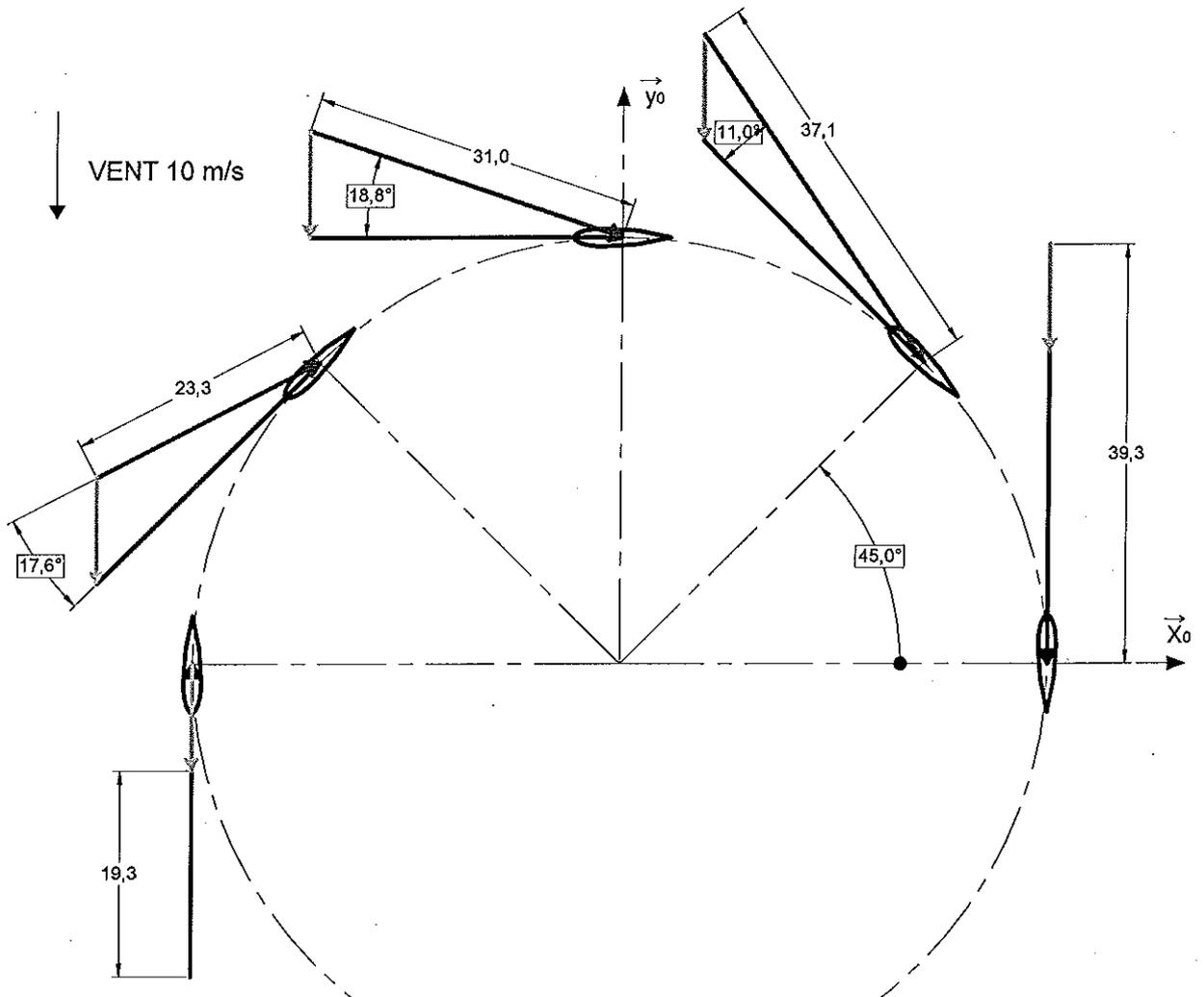
Port standard : transit services fournis ou requis

Port flux : transit de flux physiques (matière, énergie, information)

## Question 4

Suivant le diagramme de séquence, il existe une vitesse minimale pour la mise en rotation de l'éolienne. Suivant les valeurs mesurées, cette vitesse minimale est égale à 3 m/s.

Question 5



Question 6

$$\vec{V}(P_1 \in V / I) = \vec{V}(P_1 \in V / O) + \vec{V}(P_1 \in O / I) \text{ soit } \vec{V}(P_1 \in V / I) = -V \vec{y}_0 - R\omega_{10} \vec{y}_1$$

$$\vec{V}(P_1 \in V / I) = -V(\sin\theta \vec{x}_1 + \cos\theta \vec{y}_1) - R\omega_{10} \vec{y}_1$$

$$\vec{V}(P_1 \in V / I) = -V \sin\theta \vec{x}_1 - (V \cos\theta + R\omega_{10}) \vec{y}_1$$

$$V_{rel}^2 = [V^2 + R^2 \omega_{10}^2 + 2VR\omega_{10} \cos\theta] = V^2 [1 + \lambda^2 + 2\lambda \cos\theta] \text{ soit } V_{rel} = V \sqrt{1 + \lambda^2 + 2\lambda \cos\theta}$$

$$\tan \alpha = \frac{\sin \theta}{\lambda + \cos \theta}$$

$$\lambda = \frac{R\omega_{10}}{V} = 2,93$$

Position Pale $\theta$	0°	45°	90°	135°	180°
Angle d'incidence $\alpha$	0	11,00	18,83	17,63	0
Vent relatif $V_{rel}$	39,32	37,07	30,98	23,35	19,32

Question 7

On positionne une pale d'éolienne dans une soufflerie. La pale est orientable et est fixée sur des appuis instrumentés munis de capteurs de force permettant de mesurer les réactions d'appuis suivant

les 2 directions x et y. Pour une même vitesse de vent, on modifie l'orientation de la pale, ce qui modifie l'angle d'incidence  $\alpha$ .

Mesures	Moyens de mesures
Mesure de $\alpha$	Rapporteur
Mesure de $V_{rel}$	Anémomètre
Mesures de $R_x$ et de $R_y$	Balance aérodynamique Capteurs de force permettant de mesurer la force suivant 2 directions
Calcul de $C_x(\alpha) = \frac{2R_x(\alpha)}{\rho S V_{rel}^2(\alpha)}$ ; $C_y(\alpha) = \frac{2R_y(\alpha)}{\rho S V_{rel}^2(\alpha)}$	

### Question 8

Position Pale $\theta$ (°)	0°	45°	90°	135°	180°
Angle d'incidence $\alpha$ (°)	0	11,00	18,83	17,63	0
Vent relatif $V_{rel}$ (m/s)	39,32	37,07	30,98	23,35	19,32
Coefficient $C_x(\alpha)$	0	0,8	0,85	0,9	0
Portance $R_x$ (N)	0	2374,6	1762,1	1059,9	0
Coefficient $C_z(\alpha)$ $C_y(\alpha)$	0,02	0,06	0,22	0,18	0,02
Trainée $R_y$ (N)	66,8	184,2	456,1	212,0	16,1
$\ \vec{R}(V \rightarrow P)\ $ $\ \vec{R}(V \rightarrow P)\ $ (N)	66,8	2381,7	1820,2	1080,9	16,1

### Question 9

$$\vec{M}(O, V \rightarrow P) = \vec{OP}_1 \wedge \vec{R}(V \rightarrow P) = R \vec{z}_1 \wedge R_z(V \rightarrow P) \vec{z}_r + R \vec{z}_1 \wedge -R_x(V \rightarrow P) \vec{x}_r$$

$$\vec{M}(O, V \rightarrow P) = R [R_z(\alpha) \sin \alpha - R_x(\alpha) \cos \alpha] \vec{y}_1$$

$$\vec{M}(O, V \rightarrow P) = R \left[ C_z(\alpha) \frac{\rho S}{2} V_{rel}^2 \sin \alpha \vec{y}_1 - C_x(\alpha) \frac{\rho S}{2} V_{rel}^2 \cos \alpha \right] \vec{y}_1$$

$$\vec{M}(O, V \rightarrow P) = \frac{\rho S R}{2} V_{rel}^2 [C_z(\alpha) \sin \alpha - C_x(\alpha) \cos \alpha] \vec{y}_1$$

$$\vec{M}(O, V \rightarrow P) = \frac{\rho S R}{2} V^2 (1 + \lambda^2 + 2\lambda \cos \theta) [C_z(\alpha) \sin \alpha - C_x(\alpha) \cos \alpha] \vec{y}_1$$

### Question 10

Si on néglige l'influence de la trainée, l'expression précédente peut se transformer en première approximation avec  $\tan \alpha = \alpha = \frac{\sin \theta}{\lambda + \cos \theta}$  d'où  $\vec{M}(O, V \rightarrow P) = \frac{\rho S R}{2} V^2 k \alpha^2 (1 + \lambda^2 + 2\lambda \cos \theta) \vec{y}_1$

$$\text{soit } \vec{M}(O, V \rightarrow P) = \frac{\rho S R}{2} V^2 k \left( \frac{\sin \theta}{\lambda + \cos \theta} \right)^2 (1 + \lambda^2 + 2\lambda \cos \theta) \vec{y}_1$$

$$\vec{M}(O, V \rightarrow P) = M_v \left( \frac{\sin \theta}{\lambda + \cos \theta} \right)^2 (1 + \lambda^2 + 2\lambda \cos \theta) \vec{y}_1 \text{ avec } M_v = k \frac{\rho S R}{2} V^2$$

$$\text{Soit } \vec{M}(O, V \rightarrow P) = k \frac{\rho S R}{2} V^2 F(\theta) \vec{y}_1 \text{ avec } F(\theta) = \left( \frac{\sin \theta}{\lambda + \cos \theta} \right)^2 (1 + \lambda^2 + 2\lambda \cos \theta)$$

### Question 11

Le couple disponible est

$$\bar{M}(O, V \rightarrow \text{eolienne}) = \sum_{j=0}^2 k \frac{\rho S R}{2} V^2 F(\theta + j \frac{2\pi}{3}) \bar{y}_j = k \frac{\rho S R}{2} V^2 \sum_{j=0}^2 F(\theta + j \frac{2\pi}{3}) \bar{y}_j$$

**Question 12**

La puissance mécanique disponible à la génératrice électrique est :

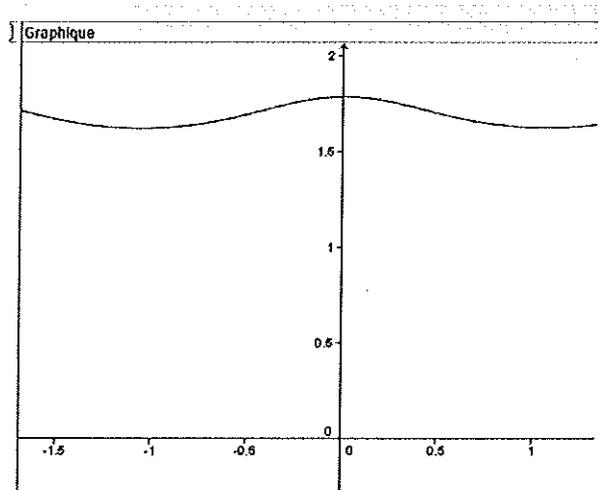
$$P(V \rightarrow \text{eolienne} / R_0) = k \frac{\rho S R}{2} V^2 \omega_{10} F(\theta) \text{ avec}$$

$$F(\theta) = \sum_{j=0}^2 \left( \frac{\sin(\theta + j \frac{2\pi}{3})}{\lambda + \cos(\theta + j \frac{2\pi}{3})} \right)^2 \left( 1 + \lambda^2 + 2\lambda \cos(\theta + j \frac{2\pi}{3}) \right)$$

Tracé de la courbe  $F(\theta)$  avec  $\lambda = 2,51$

La puissance mécanique moyenne disponible est

donc  $P(V \rightarrow \text{eolienne} / R_0) = k \frac{\rho S R}{2} V^2 \omega_{10} 1,7$

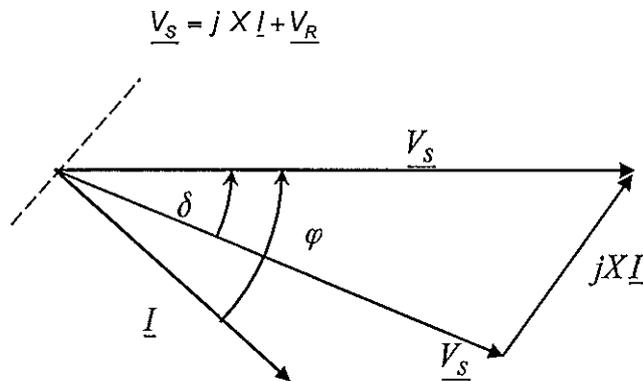


$$P(V \rightarrow \text{eolienne} / R_0) = 1,4 \times \frac{1,3 \times 3,6 \times 4}{2} 10^2 \times 6,28 \times 1,7 = 13989 \text{ W}$$

**Question 13**

La courbe montre que la puissance varie légèrement en fonction de la position des pales. La vitesse de rotation étant constante, cette variation est donc due à une variation de la force. Ceci peut engendrer des vibrations sur le mât et aura une incidence sur son dimensionnement.

**Question 14**



**Question 15**

$$P_S = 3 V_S I \cos \varphi \text{ or } V_R \sin \delta = IX \cos \varphi \text{ donc } P_S = 3 \frac{V_S V_R}{X} \sin \delta$$

$$Q_S = 3 V_S I \sin \delta \text{ or } V_S = X I \sin \varphi + V_R \cos \delta \text{ donc } Q_S = \frac{3 V_S}{X} (V_S - V_R \cos \delta)$$

En fonctionnement normal, l'angle  $\delta$  reste petit.

**Question 16**

$$\text{on a } P_S = 3 \frac{V_S V_R}{X} \sin \delta \text{ et } Q_S = \frac{3 V_S}{X} (V_S - V_R \cos \delta)$$

Les deux paramètres sur lesquels on peut agir pour ajuster le transfert de l'énergie sont  $V_R$  et  $\delta$ . Le générateur étant pourvu d'aimant permanent, il n'est pas nécessaire de produire un courant magnétisant statorique. On peut donc imposer  $Q_S = 0$ .

**Question 17**

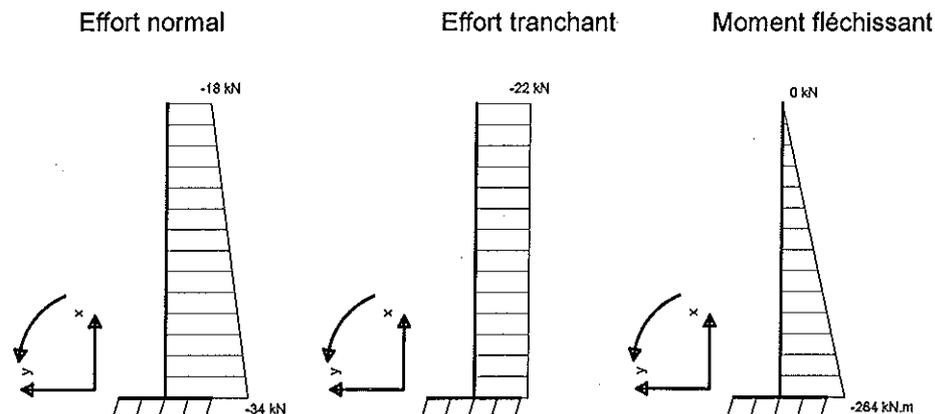
$$\text{Si } Q_S = 0 \text{ alors } Q_S = \frac{3 V_S}{X} (V_S - V_R) \text{ soit } V_S = V_R \text{ et } \delta = 3 \frac{P_S X}{V_S^2}.$$

**Question 18**

- Le capteur de position angulaire permet de connaître la phase de la tension  $V_S$  ;
- Le capteur de courant et la connaissance de la réactance  $X$  permettent de déterminer la norme de  $V_S$  ;
- La puissance active de référence est déterminée à partir de la caractéristique d'optimisation Puissance Mécanique en fonction de la vitesse du pendule, vitesse que l'on connaît grâce au capteur de vitesse placé sur le générateur.

Il est donc possible de piloter le convertisseur AC/DC en imposant  $V_R$  et  $\delta$ . Grâce à cette loi de commande, il est tout à fait possible de régler la puissance active fournie par le générateur en optimisant l'énergie récupérée en fonction des caractéristiques de la houle et du flotteur.

**Question 19**



**Question 20**

La répartition des contraintes normales dans la section A est  $\sigma(y) = \frac{N}{A} - \frac{M}{I_{Gy}} y$

avec  $I_{Gy} = \frac{\pi(D_o^4 - D_i^4)}{64} = \frac{\pi(0,54^4 - 0,52^4)}{64} = 5,85 \cdot 10^{-4} m^4$

avec l'aire du mât =  $A = \frac{\pi(D_o^2 - D_i^2)}{4} = \frac{\pi(0,54^2 - 0,52^2)}{4} = 1,67 \cdot 10^{-2} m^2$

La contrainte maximum de compression dans la section A vaut donc :

$$\sigma(y) = \frac{N}{A} - \frac{M}{I_{Gy}} y = \frac{-34 \cdot 10^{-3}}{1,66 \cdot 10^{-2}} - \frac{-264 \cdot 10^{-3}}{5,8484 \cdot 10^{-4}} \times (-0,27) = -2,05 - 121,88 = -124 \text{ MPa}$$

et est inférieure à la limite élastique de 235 MPa.

**Question 21**

$EI_{Gy} \frac{d^2x(z)}{dz^2} = M_y$  avec  $M_y = F(L-z)$  soit  $EI_{Gy} \frac{d^2x(z)}{dz^2} = F(L-z)$

$EI_{Gy} \frac{dx(z)}{dz} = FLz - F \frac{z^2}{2} + A$  et donc  $EI_{Gy} x(z) = FL \frac{z^2}{2} - F \frac{z^3}{6} + Az + B$

Les conditions aux limites permettent d'écrire  $x(0) = 0$  donc  $B = 0$  et  $\frac{dx(0)}{dz} = 0$  donc  $A = 0$

Finalement :  $EI_{Gy} x(z) = FL \frac{z^2}{2} - F \frac{z^3}{6}$  et donc  $EI_{Gy} x(L) = F \frac{L^3}{2} - F \frac{L^3}{6}$  soit  $x(L) = F \frac{L^3}{3EI_{Gy}}$

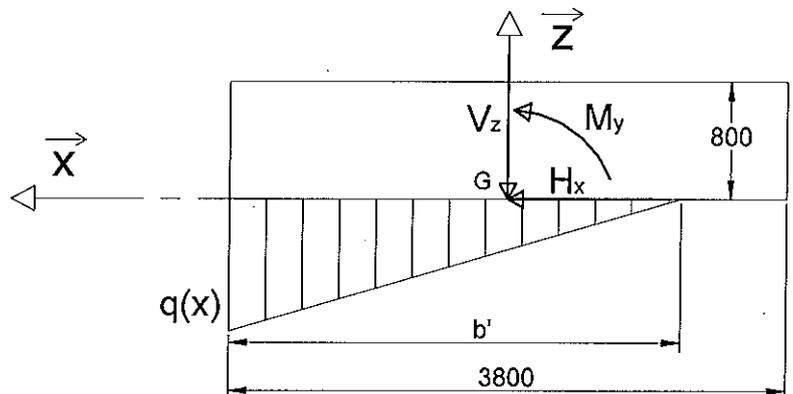
$$x(L) = \frac{FL^3}{3EI_{Gy}} = \frac{22\,000 \times 12^3}{3 \times 210\,000 \cdot 10^6 \times 5,8484 \cdot 10^{-4}} = 0,103m$$

**Question 22**

$$\{T(\text{semelle} \rightarrow \text{sol})\} = \begin{Bmatrix} 22 & 0 \\ 0 & 282 \\ -323 & 0 \end{Bmatrix}_{G,x,y,z}$$

La répartition des contraintes  $q(x)$  exercées par la semelle sur le sol est modélisée sur la figure ci-dessous.

$$\{T(\text{semelle} \rightarrow \text{sol})\} = \begin{Bmatrix} H_x & 0 \\ 0 & M_y \\ -V_z & 0 \end{Bmatrix}_{G,x,y,z}$$



**Question 23**

Les contraintes normales  $q(x)$  exercées par le sol sur la semelle équilibrent les actions mécaniques

$$\text{de la semelle sur le sol donc } \begin{cases} V_z = 323 \text{ kN} = \frac{3,8 q b'}{2} \\ M_y = 282 \text{ kNm} = \frac{3,8 q b'^2}{2} (1,9 - b'/3) \end{cases} \text{ soit } b' = 3(1,9 - \frac{282}{323}) = 3,08 \text{ m}$$

$$q = \frac{2.323}{3,8 \cdot 3,08} 10^{-3} = 0,055 \text{ MPa}$$

La contrainte maximale  $q = 0,055 \text{ MPa} < 0,20 \text{ MPa}$ . La contrainte maxi de compression est inférieure à la contrainte admissible du sol de fondation.

La surface de sol comprimée est  $S_c = 3,08 \cdot 3,8 = 11,7 \text{ m}^2 > 0,75 \cdot 3,8^2 = 10,83 \text{ m}^2$ . La surface décomprimée est inférieure au 1/3 de la surface de la semelle.

#### Question 24

$$f = \frac{N = 0 \text{ à } 60}{60} = 0 \text{ à } 1 \text{ Hz}$$

#### Question 25

Oui car la fréquence propre fondamentale de la structure (0,715 Hz) est proche des fréquences d'utilisation.

#### Question 26

Théorème du moment dynamique appliqué au tronçon, au point G, en projection sur l'axe  $\vec{z} y$   
 $M_{y,z+dz} - M_{y,z} + T_x(z) dz = 0$  (en négligeant le moment d'inertie du tronçon autour de l'axe Gz)

Théorème de la résultante dynamique appliqué au tronçon, en projection sur l'axe  $\vec{x} x$

$$T_x(z+dz) - T_x(z) = \rho S \frac{d^2 x(t)}{dt^2} dz$$

$$\text{Soit } \frac{dM_y(z)}{dz} + T_x(z) = 0 \text{ donc } \frac{d^2 M_y(z)}{dz^2} + \frac{dT_x(z)}{dz} = 0 \text{ or } \frac{dT_x(z)}{dz} = \rho S \frac{d^2 x(t)}{dt^2}$$

$$\text{donc } \frac{d^2 M_y(z)}{dz^2} + \rho S \frac{d^2 x(t)}{dt^2} = 0 \text{ or } E I_{Gy} \frac{d^2 x(z)}{dz^2} = M_y \text{ soit } \frac{\partial^4 x(z,t)}{dz^4} + \frac{\rho S}{E I_{Gy}} \frac{\partial^2 x(z,t)}{dt^2} = 0$$

#### Question 27

$$\frac{d^4 X(z)}{dz^4} e(i\omega t) - \frac{\rho S \omega^2}{E I_{Gy}} X(z) e(i\omega t) = 0 \text{ soit } \frac{d^4 X(z)}{dz^4} - K^4 X(z) = 0 \quad (1) \text{ si on pose } K = \sqrt[4]{\frac{\rho S}{E I_{Gy}}} \omega^2 \text{ alors}$$

$$K_1 = K \quad K_2 = -K \quad K_3 = iK \quad K_4 = -iK$$

#### Question 28

$$X(z) = A \exp(Kz) + B \exp(-Kz) + C \exp(iKz) + D \exp(-iKz)$$

$$X(z) = A[\operatorname{ch}(Kz) + \operatorname{sh}(Kz)] + B[\operatorname{ch}(Kz) - \operatorname{sh}(Kz)] + C[\cos(Kz) + i \sin(Kz)] + D[\cos(Kz) - i \sin(Kz)]$$

$$X(z) = \operatorname{ch}(Kz)(A+B) + \operatorname{sh}(Kz)(A-B) + \cos(Kz)(C+D) + i \sin(Kz)(C-D)$$

$$\text{Soit } X(z) = A_1 \sin(Kz) + A_2 \cos(Kz) + A_3 \operatorname{sh}(Kz) + A_4 \operatorname{ch}(Kz)$$

#### Question 29

$$X(0) = 0 \text{ soit } A_2 + A_4 = 0$$

$$\frac{dX}{dz}(0) = 0 \text{ soit } A_1 + A_3 = 0$$

$$\frac{d^2 X}{dz^2}(L) = 0 \text{ soit } -A_1 \sin(KL) - A_2 \cos(KL) + A_3 \operatorname{sh}(KL) + A_4 \operatorname{ch}(KL) = 0$$

$$\frac{d^3 X}{dz^3}(L) = 0 \text{ soit } -A_1 \cos(KL) + A_2 \sin(KL) + A_3 \operatorname{ch}(KL) + A_4 \operatorname{sh}(KL) = 0$$

$$A_2 + A_4 = 0$$

$$A_1 + A_3 = 0$$

$$-A_1 \sin(KL) - A_2 \cos(KL) + A_3 \operatorname{sh}(KL) + A_4 \operatorname{ch}(KL) = 0$$

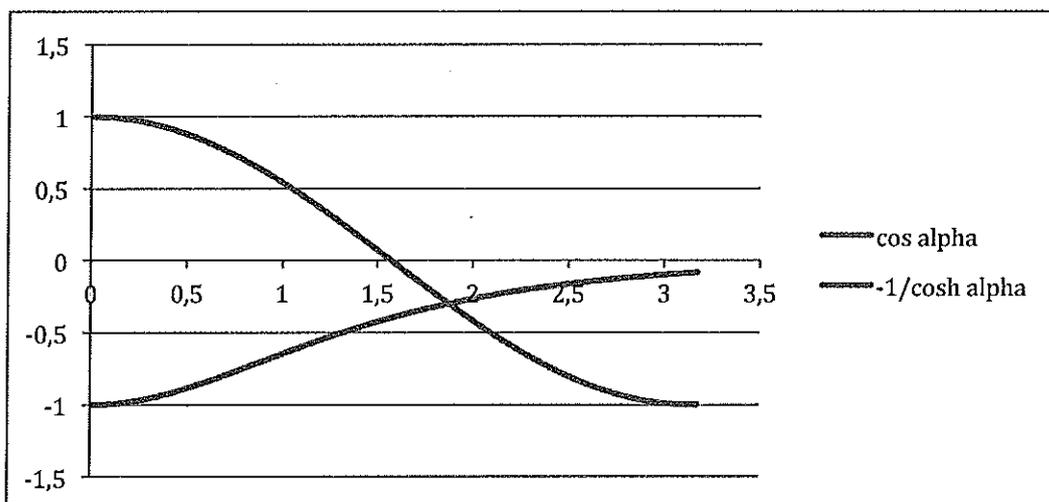
$$-A_1 \cos(KL) + A_2 \sin(KL) + A_3 \operatorname{ch}(KL) + A_4 \operatorname{sh}(KL) = 0$$

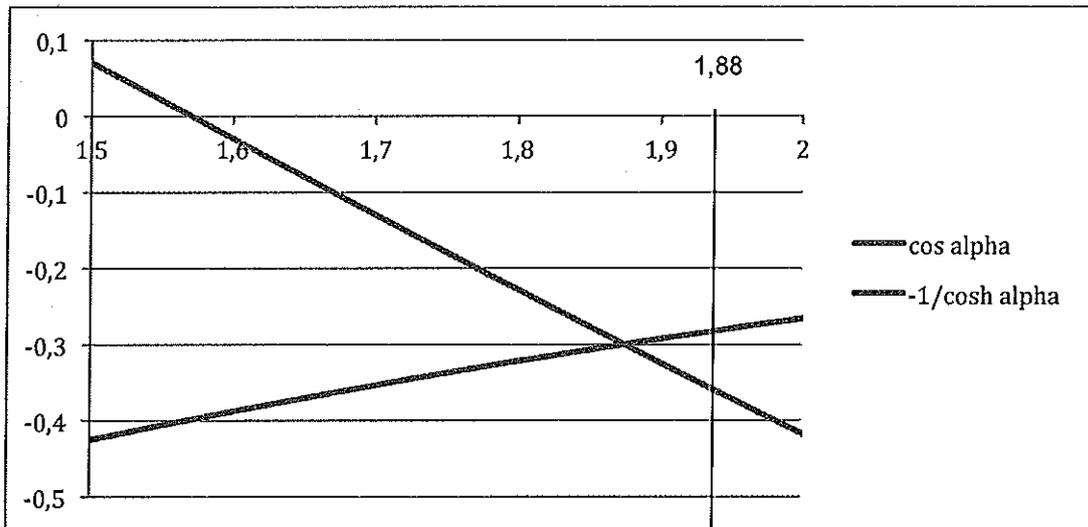
$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin(KL) & -\cos(KL) & \operatorname{sh}(KL) & \operatorname{ch}(KL) \\ -\cos(KL) & \sin(KL) & \operatorname{ch}(KL) & \operatorname{sh}(KL) \end{bmatrix}$$

### Question 30

Si on admet que  $\frac{1}{\operatorname{ch}(KL)}$  tend vers 0 très rapidement, l'équation 2 devient  $\cos(KL) = 0$  au-delà du

mode fondamental soit  $\alpha_i = (2k+1)\frac{\pi}{2}$  pour  $i \geq 2$





On trouve  $\alpha_1 = 1,88$        $\alpha_2 = \frac{3\pi}{2} = 4,71$        $\alpha_3 = \frac{5\pi}{2} = 7,85$        $\alpha_4 = \frac{7\pi}{2} = 10,99$

Les pulsations propres sont donc  $\omega_{i0} = \sqrt{\frac{\alpha_i^4 E I_{Gy}}{L^4 \rho S \alpha_i^4}}$  avec  $S = \pi \frac{D_e^2 - D_i^2}{4}$  et  $I_{Gy} = \pi \frac{D_e^4 - D_i^4}{64}$

Soit  $\omega_{i0} = \frac{\alpha_i^2}{4L^2} \sqrt{\frac{E(D_e^2 + D_i^2)}{\rho}}$ . Les fréquences propres, au-delà du fondamental, sont

donc  $f_{i0} = \frac{\alpha_i^2}{8\pi L^2} \sqrt{\frac{E(D_e^2 + D_i^2)}{\rho}}$  pour  $i \in [1,4]$ .

### Question 31

La fréquence propre de la structure (3,77 Hz) est supérieure de 20% aux fréquences d'utilisation, donc il n'y a pas de risque de résonance si le rotor tourne à une vitesse supérieure, comme

$f = \frac{226,2}{60} = 3,77$  Hz pour un vent inférieur à 20 m/s, il faut arrêter par sécurité le rotor, sinon il y a

risque de problèmes.

### Question 32

Théorème du moment dynamique appliqué à la pale, au point G, en projection sur  $\vec{z}$

$\vec{\delta}(G, 2/0) \cdot \vec{z} = \vec{M}(G, \text{mot} \rightarrow 2) \cdot \vec{z} + \vec{M}(G, \text{frot} \rightarrow 2) \cdot \vec{z} + \vec{M}(G, \text{pes} \rightarrow 2) \cdot \vec{z} + \vec{M}(G, \text{vent} \rightarrow 2) \cdot \vec{z}$  avec

$\vec{\delta}(G, 2/0) = J \frac{d^2 \theta_{20}(t)}{dt^2} \vec{z} = J \frac{d^2 \theta_{21}(t)}{dt^2} \vec{z}$  car  $\Omega_{10} = \text{constante}$  soit  $J \frac{d^2 \theta_{21}}{dt^2} = K i(t) - f \frac{d\theta_{21}}{dt}$

### Question 33

La sortie du système s'écrit sous la forme :  $y = CX + Du$

D'après l'équation (4) on a  $\dot{x}_1 = -\frac{f}{J} x_1 + \frac{K}{J} i$

D'après l'équation (1) on a  $i = -\frac{K}{l} x_1 - \frac{R}{l} i + \frac{1}{l} u$  donc  $\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{f}{J} & \frac{K}{J} \\ -\frac{K}{l} & -\frac{R}{l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{l} \end{bmatrix} u$

**Question 34**

On cherche à asservir la position angulaire de la pale donc la grandeur de sortie du système est la position angulaire du rotor du moteur à courant continu  $\theta$ . On trouve immédiatement que  $C = [0 \ 0 \ 1]$  et  $D = [0]$

**Question 35**

A l'aide du formalisme de Laplace, on peut exprimer le vecteur d'état  $X$  à l'aide de l'équation (3) :

$$pX = AX + B U(p)$$

soit

$$(pI - A)X = B U(p)$$

et donc

$$X = (pI - A)^{-1} B U(p)$$

et en introduisant cette expression dans (4), il vient  $Y(p) = [C(pI - A)^{-1} B + D] U(p)$

soit finalement

$$H(p) = C(pI - A)^{-1} B + D$$

**Question 36**

Pour calculer  $H(p)$ , il n'est pas nécessaire de calculer tous les termes de la matrice  $(pI - A)^{-1}$ , seul le coefficient  $X_{32}(p)$  est utile.

$$\det(pI - A) = p \left[ \left( p + \frac{f}{J} \right) \left( p + \frac{R}{I} \right) + \frac{K^2}{IJ} \right]$$

et finalement

$$H(p) = \frac{\frac{K}{J}}{p \left[ \left( p + \frac{f}{J} \right) \left( p + \frac{R}{I} \right) + \frac{K^2}{IJ} \right]}$$

On vérifie bien que les pôles de la fonction de transfert en boucle ouverte sont les racines du polynôme caractéristique de  $A$ . Par ailleurs, le système présente une intégration dans la chaîne directe. Il est donc de classe 1. L'erreur statique de position en boucle fermée est nulle.

**Question 37**

D'après la figure 3 on a toujours  $\dot{X} = AX + Bu(t)$  or  $u(t) = G_0 y_{ref} - K^t X$ .

En remplaçant l'expression de  $u(t)$  dans l'équation initiale, il vient  $\dot{X} = AX + B(G_0 y_{ref} - K^t X)$

soit  $\dot{X} = (A - BK^t) X + B G_0 y_{ref}$  avec  $A_{BF} = A - BK^t$  et  $B_{BF} = B G_0$ .

**Question 38**

En régime permanent on a  $\dot{X} = 0$  donc  $AX + B(G_0 y_{ref} - K^t X) = 0$  avec  $\begin{bmatrix} X_{1\infty} \\ i_{\infty} \\ \theta_{\infty} \end{bmatrix}$  donc

$X_{\infty} = -(A - BK^t)^{-1} B G_0 y_{ref}$ . En ne calculant que le terme qui nous intéresse de la matrice  $(A - BK^t)^{-1}$ , c'est à dire le terme situé à l'intersection de la 3<sup>e</sup> ligne et de la 2<sup>e</sup> colonne, on obtient  $\theta_{\infty} = \frac{I G_0 y_{ref}}{K_3}$  soit

$$G_0 = \frac{K_3}{I}$$

**Question 39**

Nous avons montré précédemment que les pôles de la fonction de transfert en boucle ouverte sont les racines du polynôme caractéristique de la matrice  $A$ . Pour la fonction de transfert en boucle fermée, il en est de même avec la matrice  $A_{BF}$ .

$$\text{Donc } \det(pI - A) = \frac{Jl}{KK_3} p^3 + \frac{p^2}{KK_3} (JR + JK_2 + fl) + \frac{p}{KK_3} (Rf + K_2 f + KK_1 + K^2) + 1 = 0$$

$$p^3 + \frac{p^2}{Jl} (JR + JK_2 + fl) + \frac{p}{Jl} (Rf + K_2 f + KK_1 + K^2) + \frac{KK_3}{Jl} = 0$$

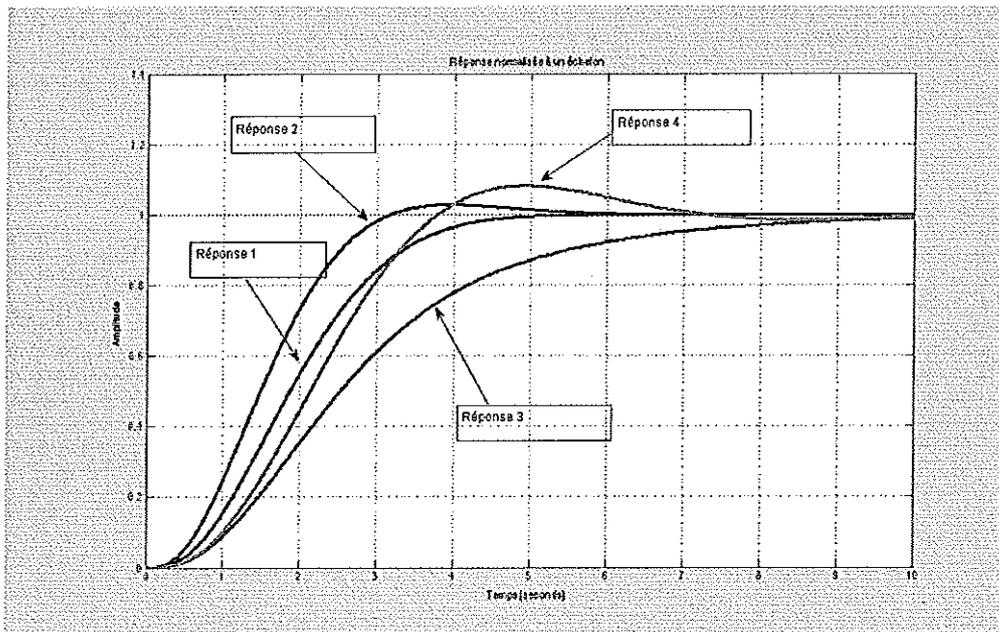
$$(p - r_0)(p - p_1)(p - \bar{p}_1) = p^3 - p^2(2r_1 + r_0) + p(r_1^2 + c_1^2 + 2r_0 r_1) - r_0(r_1^2 + c_1^2)$$

$$\text{par identification : } -(2r_1 + r_0) = \frac{JR + JK_2 + fl}{Jl} \quad r_1^2 + c_1^2 + 2r_0 r_1 = \frac{Rf + K_2 f + KK_1 + K^2}{Jl}$$

$$-r_0(r_1^2 + c_1^2) = \frac{KK_3}{Jl}$$

#### Question 40

Pôles	Réponse 1	Réponse 2	Réponse 3	Réponse 4
$r_0$	-1	-2	-0,5	-1
$p_1$	$-1 + j$	$-1 + j$	$-1 + j$	$-0,5 + j\frac{\sqrt{3}}{2}$
$\bar{p}_1$	$-1 - j$	$-1 - j$	$-1 - j$	$-0,5 - j\frac{\sqrt{3}}{2}$



La réponse la plus intéressante est la réponse 2 car c'est la plus rapide et elle ne présente qu'un faible dépassement pas vraiment gênant pour l'asservissement de la pale.

En première approximation, on peut considérer que  $\omega_0 t_m \approx 3$ . Donc pour répondre au critère de rapidité du cahier des charges, il faut que  $\omega_0 \approx \frac{3}{t_m} = 30 \text{ rad.s}^{-1}$ . La pulsation propre du système

normalisé est  $\omega_n = \sqrt[3]{r_0(r_1^2 + c_1^2)} = 1,57 \text{ rad.s}^{-1}$ , avec  $r_0$  la racine réelle,  $r_1$  et  $c_1$  respectivement la partie réelle et la partie complexe des deux racines complexes.

Pour conserver la même nature de réponse on a donc  $\omega_0 = \rho^3 \omega_n$  soit  $r_0^n = \rho r_0$ ,  $r_1^n = \rho r_1$  et  $c_1^n = \rho c_1$  les racines souhaitées pour obtenir un temps de réponse suffisant du système corrigé et une réponse

présentant la forme 2. On peut alors déterminer à partir du résultat de la question 8 les coefficients  $K_1$ ,  $K_2$  et  $K_3$  de la matrice de retour d'état.

**Question 41**

On constate que la commande par retour d'état permet de régler toutes les constantes du système. L'asservissement de position de la pale est donc envisageable. On a vu que le système en boucle ouverte présente une seule intégration, ce qui garantit une erreur statique nulle. Par contre comme il s'agit d'un asservissement en suivi de position, le système présentera une erreur de suivi non nulle. Si l'on souhaite conserver la commande étudiée il pourra être intéressant de vérifier que cette erreur n'est pas trop importante, et éventuellement augmenter la bande passante du système en boucle fermée afin de la réduire.

**Question 42**

L'énergie cinétique de la colonne d'air de profondeur  $dx$  est  $E_c = \frac{1}{2} mV^2$  avec  $m = \rho \times S \times Vdt$  ainsi la puissance éolienne est  $P = \frac{1}{2} \rho S V^3$  donc  $P = \frac{1}{2} 1,3 \times 64 \times 10^3 = 41,6 \text{ kW}$

**Question 43**

Coefficient de puissance  $C_p = \frac{10000}{41600} = 0,24$

**Question 44**

Hydraulique : 70%, Photovoltaïque : 10%, Solaire thermique : 15%

**Question 45**

Désignations	Quantités	Bilan Carbone en kg CO <sub>2</sub> par kg	Bilan Carbone en kg de CO <sub>2</sub>
Éolienne	1	-	3 500 kg
Mat en acier (7850 kg / m <sup>3</sup> )	1 600 kg	1,31 kg CO <sub>2</sub> / kg	2 096 kg
Fondation en béton armé (2500 kg / m <sup>3</sup> )	28 880 kg	0,121 kg CO <sub>2</sub> / kg	3 494 kg
Total	-	-	9 090 kg

**Question 46**

Production de 1 kWh avec	Émission correspondante en kg de CO <sub>2</sub>
Charbon	0,75 kg
Mazout	0,60 kg
Gaz	0,35 kg

# Corrigé épreuve modélisation d'un système, d'un procédé ou d'une organisation

## Partie I. Caméra et Acquisition du signal vidéo (Q1 à Q12)

Q1 – fréquence du signal d'horloge  $f = 640 \times 480 \times 24 = 7.3728$  MHz

Q2 – bloc traitement vidéo

Q3 – code C++ correspondant à la méthode `extract_CCD_img()`: voir dans le document réponse **DR1**

```
Bool C_CCD ::extract_CCD_img(void)
{
  int x,y ;

  for (x=0 ;x<640 ; x++)
  {
    for (y=0 ; y<480 ; y++)
    {
      WaitTic() ;
      img_in[X][Y]=PixCAN ;
    };
  };
  return TRUE ;
}
```

Q4 –

+ : attribut public

- : attribut privé

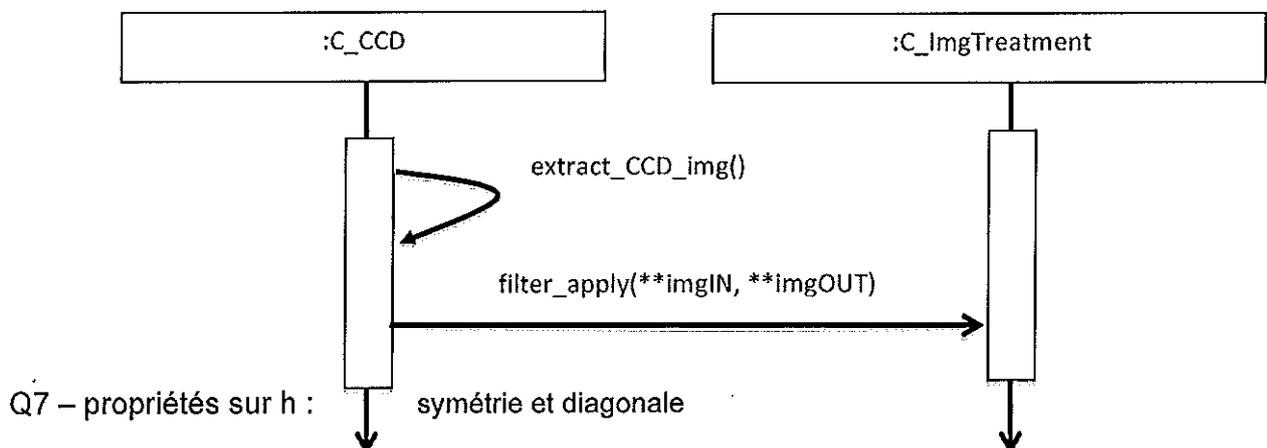
La flèche avec cette base représente une relation de composition entre les deux classes.

Q5 – Le type byte désigne une variable codée sur 1 octet (8bits) ce qui correspond à la taille mémoire nécessaire au stockage de la valeur de luminance d'un pixel.

Quantum =  $1/2^8 - 1 = 1/(255) = 3.9$  mV ; même fréquence  $f = 640 \times 480 \times 24 = 7.3728$  MHz

Convertisseur de type flash par exemple.

Q6 – diagramme de séquence UML associé :



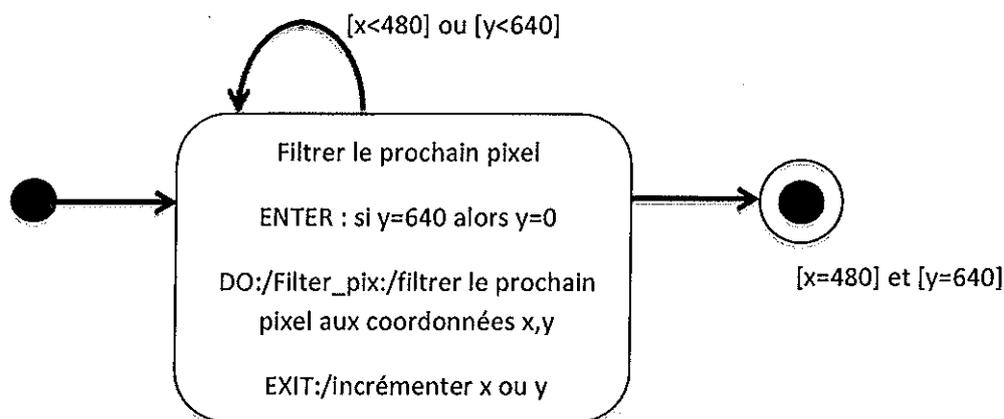
Q7 – propriétés sur h :

Q8 – pseudo-code de cette méthode `filter_pix(**imgIN, int x,y)` :

`filter_pix(**imgIN, int x,y)`

- Float temp=0
- Pour xp variant de 0 à 4 par pas de 1 faire
- Début pour xp
  - Pour yp variant de 0 à 4 par pas de 1 faire
    - Début pour yp
    - Si ((x+xp-2)>0 ou (y+yp-2) > 0 ou (x+xp-2)<639 ou (y+yp-2)<479) alors
      - Début Alors
      - Temp=temp+1/159\* filter\_matrix[xp][yp]\*imgIN[x+xp-2][y+yp-2]
      - Fin Alors
    - Fin pour yp
- Fin pour xp
- Retourne la valeur transtypée en type byte de temp

Q9 – diagramme d'état-transition:



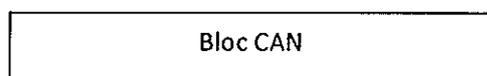
Q10 – pseudo-code:

`void filter_apply(byte **imgIN, byte **imgOUT)`

`int x=0,y=0`

- Pour xp variant de 0 à 479 par pas de 1 faire
- Début pour xp
  - Pour yp variant de 0 à 639 par pas de 1 faire
    - Début pour yp
    - `imgOUT[xp][yp]= filter_pix(**imgIN, xp,yp)`
    - Fin pour yp
- Fin pour xp
- Retourne la valeur transtypée en type byte de temp

Q11 – détail du bloc CAN :



<p>Contraintes</p> <ul style="list-style-type: none"><li>+8 bits</li><li>+entrée 1V</li><li>+fréquence de travail <math>f=24*640*480</math></li></ul>
<p>Opérations</p> <ul style="list-style-type: none"><li>+Convertir un pixel sur 8 bits</li><li>+Envoyer un signal de fin de conversion</li></ul>

Q12 –

*résolution en mégapixels du capteur de cette caméra : 646 x 485*

*termes :*

*« horizontal frequency », balayage horizontal*

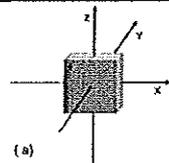
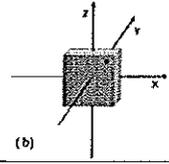
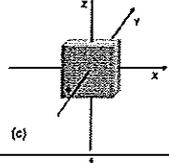
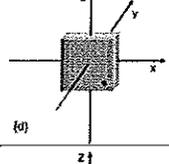
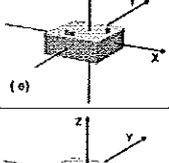
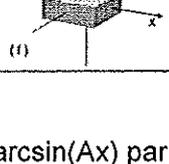
*« vertical frequency », balayage vertical*

*« minimum illumination », éclairage minimal (0.5 lux) lié à la sensibilité de la caméra*

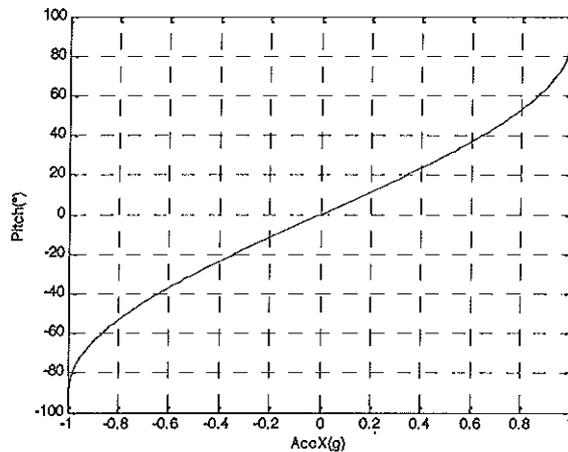
*« S/N ratio », rapport signal à bruit*

Partie II. Suivi des mouvements de l'œil à l'aide d'un accéléromètre (Q13 à Q26)

Q13 – tableau du document réponse DR2 :

Ligne	Position	Accélération sur $X_c$	Accélération sur $Y_c$	Accélération sur $Z_c$
1		-1g <input type="checkbox"/> 0g <input type="checkbox"/> x +1g <input type="checkbox"/>	-1g <input type="checkbox"/> 0g <input type="checkbox"/> +1g <input type="checkbox"/> x	-1g <input type="checkbox"/> 0g <input type="checkbox"/> x +1g <input type="checkbox"/>
2		-1g <input type="checkbox"/> 0g <input type="checkbox"/> +1g <input type="checkbox"/>	-1g <input type="checkbox"/> 0g <input type="checkbox"/> +1g <input type="checkbox"/>	-1g <input type="checkbox"/> 0g <input type="checkbox"/> +1g <input type="checkbox"/>
3		-1g <input type="checkbox"/> 0g <input type="checkbox"/> +1g <input type="checkbox"/>	-1g <input type="checkbox"/> 0g <input type="checkbox"/> +1g <input type="checkbox"/>	-1g <input type="checkbox"/> 0g <input type="checkbox"/> +1g <input type="checkbox"/>
4		-1g <input type="checkbox"/> 0g <input type="checkbox"/> +1g <input type="checkbox"/>	-1g <input type="checkbox"/> 0g <input type="checkbox"/> +1g <input type="checkbox"/>	-1g <input type="checkbox"/> 0g <input type="checkbox"/> +1g <input type="checkbox"/>
5		-1g <input type="checkbox"/> 0g <input type="checkbox"/> +1g <input type="checkbox"/>	-1g <input type="checkbox"/> 0g <input type="checkbox"/> +1g <input type="checkbox"/>	-1g <input type="checkbox"/> 0g <input type="checkbox"/> +1g <input type="checkbox"/>
6		-1g <input type="checkbox"/> 0g <input type="checkbox"/> +1g <input type="checkbox"/>	-1g <input type="checkbox"/> 0g <input type="checkbox"/> +1g <input type="checkbox"/>	-1g <input type="checkbox"/> 0g <input type="checkbox"/> +1g <input type="checkbox"/>

Q14 – pitch = arcsin(Ax) par projection des vecteurs (document réponse DR2)



Q15 – Etendue +ou - 90° car la fonction est périodique ; suffisante car l'inclinaison classique de la tête ne dépassera pas cette gamme.

Q16 –

$$\text{sensibilité} = \frac{d\text{Arcsin}(Accx)}{dAccx} = \frac{1}{\sqrt{1 - Accx^2}}$$

Q17 – Sensibilité non linéaire et même nulle autour de +/-90° (mais pas critique pour l'application)

Incertitude sur la mesure : les valeurs obtenues sont indéterminées à  $\pi - \alpha$  près.

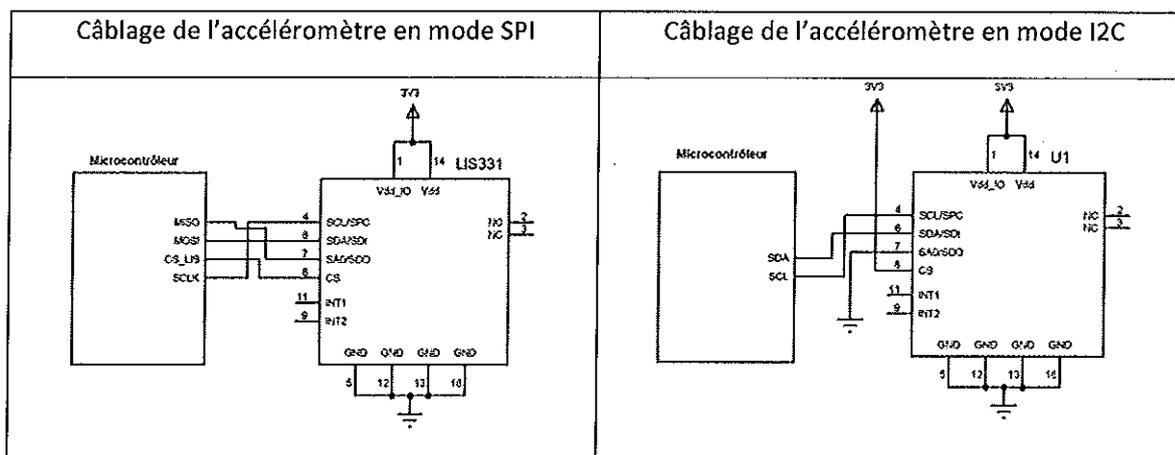
Une mesure de pitch à 30° donne le même résultat qu'à 150°

Q18 – document réponse **DR3**:

Valeurs d'accélération sur axe XC	Valeur de FS1..0	OUT_X_H (hexa)	OUT_X_L (hexa)
0g	00	00	00
350mg	00	01	5E
1g	00	03	E8
-350mg	00	FE	A2
-1g	11	F0	00

Q19 – document réponse **DR4** le schéma d'interconnexion en mode SPI

Q20 – document réponse **DR4** le schéma d'interconnexion en mode I2C



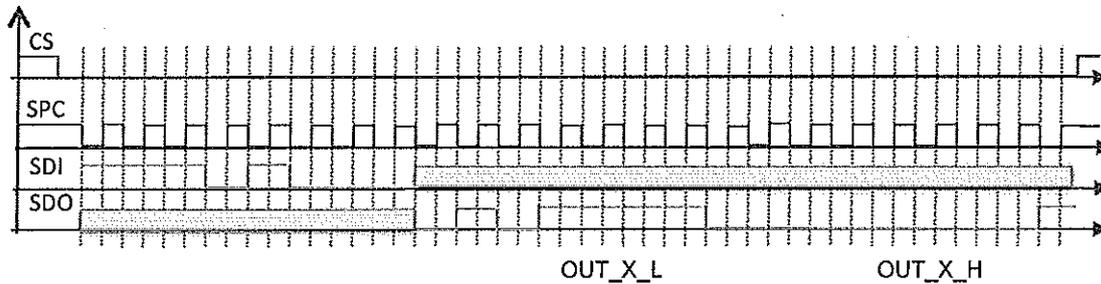
Q21. Sélection du circuit par un signal Chip select sur bus SPI : le circuit sélectionné est connecté au bus, les autres restent en haute impédance

Sélection du circuit par l'émission d'une adresse sur bus I2C : chaque circuit dispose d'une adresse interne + plusieurs broches permettant de compléter cette adresse. Le circuit reste connecté au bus lorsque son adresse interne + externe correspond à celle émise sur le bus par le maître.

Q22.

Vu en Q18 que pour 350mg :

OUT_X_H (hexa)	OUT_X_L (hexa)
01	5E



Q23 – Sensibilité & désalignement = matrice [A11 .. A33]

Décalage = matrice [A10, A20, A30]

Q24 –

$$\begin{bmatrix} Ax_{reelle} & Ay_{reelle} & Az_{reelle} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Ax_m & Ay_m & Az_m & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Acc_{11} & Acc_{21} & Acc_{31} \\ Acc_{12} & Acc_{22} & Acc_{32} \\ Acc_{13} & Acc_{23} & Acc_{33} \\ Acc_{10} & Acc_{20} & Acc_{30} \end{bmatrix}$$

donc

$$X = \begin{bmatrix} Acc_{11} & Acc_{21} & Acc_{31} \\ Acc_{12} & Acc_{22} & Acc_{32} \\ Acc_{13} & Acc_{23} & Acc_{33} \\ Acc_{10} & Acc_{20} & Acc_{30} \end{bmatrix}$$

Q25 – D'après la Table3 de la documentation technique, FS=00 donc sensibilité de 1mg/digit + pas d'erreur d'alignement, ni de décalage par rapport au niveau 0g

Donc :

$$X = \begin{bmatrix} 0,001 & 0 & 0 \\ 0 & 0,001 & 0 \\ 0 & 0 & 0,001 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{Q26 - } [A_{x_{reelle}} \quad A_{y_{reelle}} \quad A_{z_{reelle}}] = [230 \quad 400 \quad 50 \quad 1] \begin{bmatrix} 0.001 & 0 & -0.0001 \\ 0 & 0.001 & 0 \\ 0 & 0 & 0.001 \\ -0.0299 & -0.028 & -0.0086 \end{bmatrix}$$

$$[A_{x_{reelle}} \quad A_{y_{reelle}} \quad A_{z_{reelle}}] = [0.2001 \quad 0.372 \quad 0.0184]g$$

**Partie III. Liaison Lunettes/ Implant (Q27 à Q46)**

Q27 –

$$e_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt} \quad \text{et} \quad e_2 = -L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt}$$

Q28 –  $L_1 = L_{p1} + L_{f1}$  ;  $e'_1 = L_{p1} \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt}$  ;  $e_1 = L_{f1} \frac{di_1}{dt} + e'_1$

Q29 – nous avons plusieurs relations :

$$K_p = \frac{e_2}{e'_1} ; e_2 = -L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} = K_p L_{p1} \frac{di_1}{dt} - K_p M \frac{di_2}{dt} ; \text{donc}$$

$$\boxed{K_p L_{p1} = M \text{ et } K_p M = L_2}$$

Q30 – comme  $L_{f1} = L_1 - L_{p1} = L_1 - \frac{M}{K_p} = L_1 - \frac{M^2}{L_2}$ , on obtient

$$L_{f1} = L_1 \left( 1 - \frac{M^2}{L_1 L_2} \right) = L_1 (1 - k^2) \text{ avec } k^2 = \left( \frac{M^2}{L_1 L_2} \right)$$

Q31 – k coefficient de couplage magnétique

Q32 – tension  $e_2$  dans le domaine fréquentiel notée  $E_2(\omega)$  :

En temporel, on a  $e_2(t) = RL \cdot i_2(t)$  et  $e_2(t) = M \frac{di_1}{dt} - L_2 \frac{di_2}{dt}$

En régime permanent sinusoïdal, on a :

$$E_2(\omega) = RL \cdot I_2(\omega) \text{ et } E_2(\omega) = j\omega M I_1(\omega) - j\omega L_2 I_2(\omega)$$

$$\text{D'où } E_2(\omega) = I_1(\omega) \cdot \frac{j\omega M}{1 + j\omega L_2 / RL}$$

Q33 –  $RL = 1440 \text{ Ohm}$

Q34 –  $R_0 = \frac{R_s R_e}{R_s + R_e}$  ;  $C = C_0 (A_0 - 1)$  en écrivant loi des mailles en sortie

Q35 –  $G(\omega) = \frac{V_{AO}(\omega)}{e(\omega)} = A_0 \cdot R_0 \cdot \mu_0 \cdot \frac{1}{(1 + j\omega R_0 C) \cdot (1 + \frac{j\omega}{\omega_\mu})}$  ; gain statique  $G_0 = A_0 R_0 \mu_0$  ; fréquences

de coupure:  $f_1 = \frac{1}{2\pi R_0 C} = \frac{1}{2\pi R_0 C_0 (A_0 - 1)}$  et  $f_2 = f_\mu$

Q36 – C0 induit un risque d'oscillation de l'AO (instabilité) ; il faut ajouter une compensation pour décaler f1 vers les très basses fréquences ; autre paramètre impacté = slew rate (qui augmente si la valeur de C0 augmente)

Q37 – G0 = gain en tension = AVOL (data sheet AO) = 200V/mV = 2.10<sup>5</sup> ; f1 obtenue via le produit gain-bande (GBW du data sheet) : f1 = 20MHz / 2.10<sup>5</sup> = 100 Hz

Q38 – A(p) = G(p) et B(p) = R1/(R1+R2)

Q39 – transmittance T(p) = VAO(p)/Ve(p) du système bouclé :

$$T(p) = \frac{A(p)}{1 + A(p).B(p)} = \frac{G(p)}{1 + \frac{R1}{R1 + R2} G(p)}$$

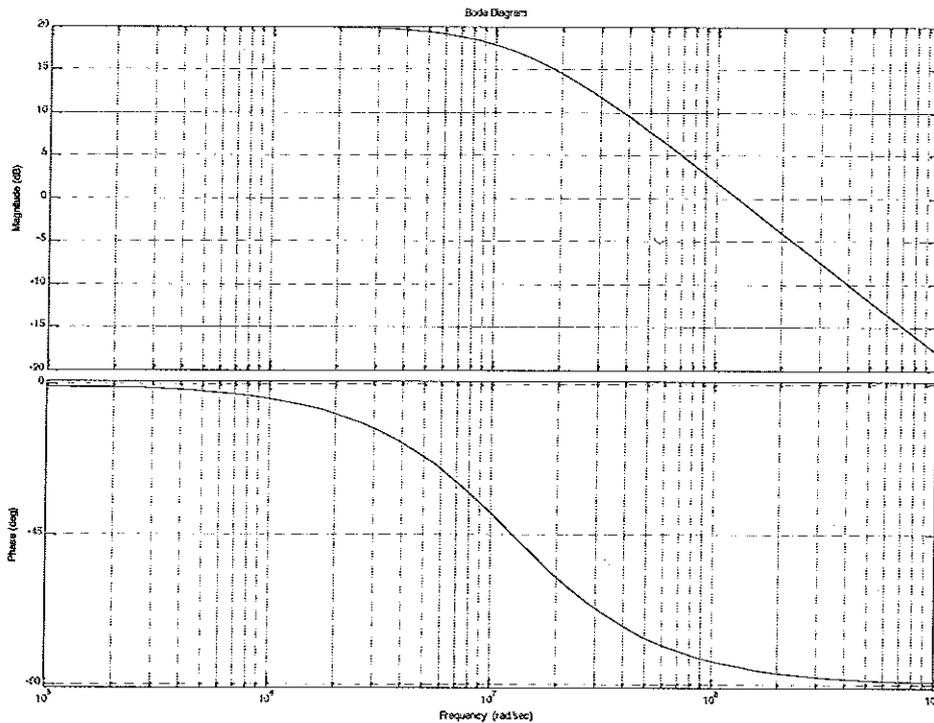
en fonction des éléments du circuit :

$$T(p) = \frac{G0}{1 + \alpha G0} \cdot \frac{1}{1 + \frac{p}{(1 + \alpha G0)\omega1}} \text{ avec } \alpha = \frac{R1}{R1 + R2} \text{ et } \omega1 = 2\pi f1$$

+ amplification de T(p) en basses fréquences :  $\frac{G0}{1 + \alpha G0} = 10$

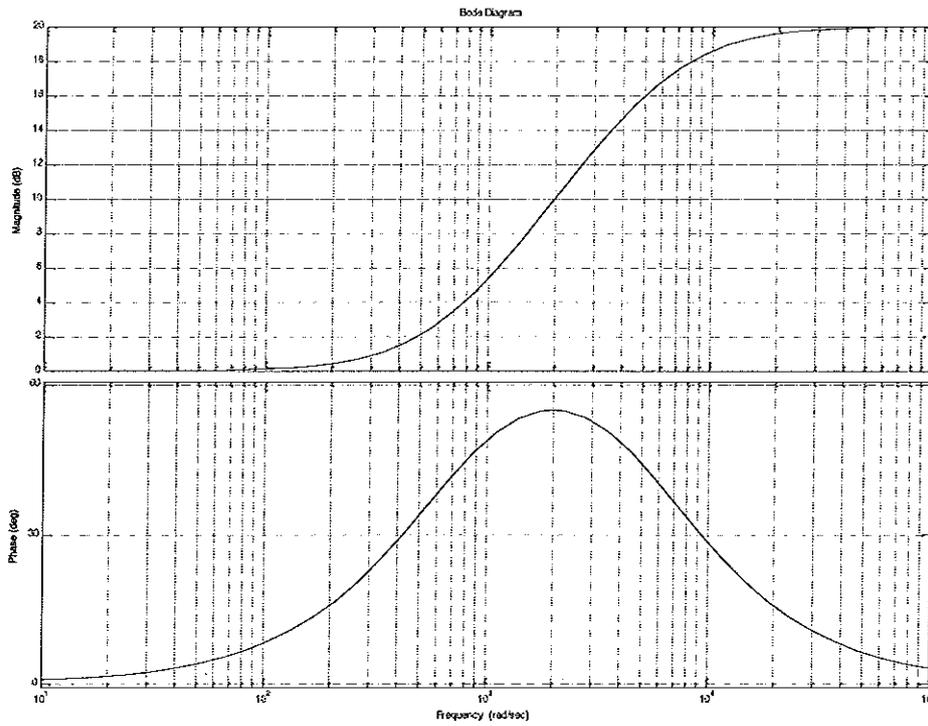
Q40 –  $\omega0 = (1 + \alpha G0)\omega1 = 2\pi f0$  donne f0 = 2MHz

Q41 – Document réponse DR5 le diagramme de Bode



Q42 –  $|T(\omega p)| = 1$  (pour 0dB) donne  $\omega p = 9,95 \times \omega0$  fp ~ 20MHz

Q43 –  $C(p) = \frac{1 + T1p}{1 + T2p}$ , Document réponse DR5 le diagramme de Bode asymptotique



Q44 –  $\omega_1 < 1/T_1 < \omega_p$  et  $1/T_2 > \omega_p$

Q45 –  $1/T_1 = \omega_1$  et  $1/T_2 = 10 \omega_1$  (soit  $T_2 = T_1/10$ )

Q46 – correcteur à avance de phase

**Partie IV. Micro-électrodes et stimulation électrique (Q47 à Q62)**

Q47 – impédance complexe équivalente  $Z_{\text{électrode}}(\omega) = R_s + \frac{R_{tc}}{1+j\omega R_{tc}C_i}$

Q48 – Décomposition:  $Z'(\omega) = R_s + \frac{R_{tc}}{1+\omega^2 R_{tc}^2 C_i^2}$  et  $Z''(\omega) = -\frac{j\omega R_{tc}^2 C_i}{1+\omega^2 R_{tc}^2 C_i^2}$

Q49 –

$$\left[ Z' - \left( R_s + \frac{R_{tc}}{2} \right) \right]^2 + [Z'']^2 = \dots = \left( \frac{R_{tc}}{2} \right)^2$$

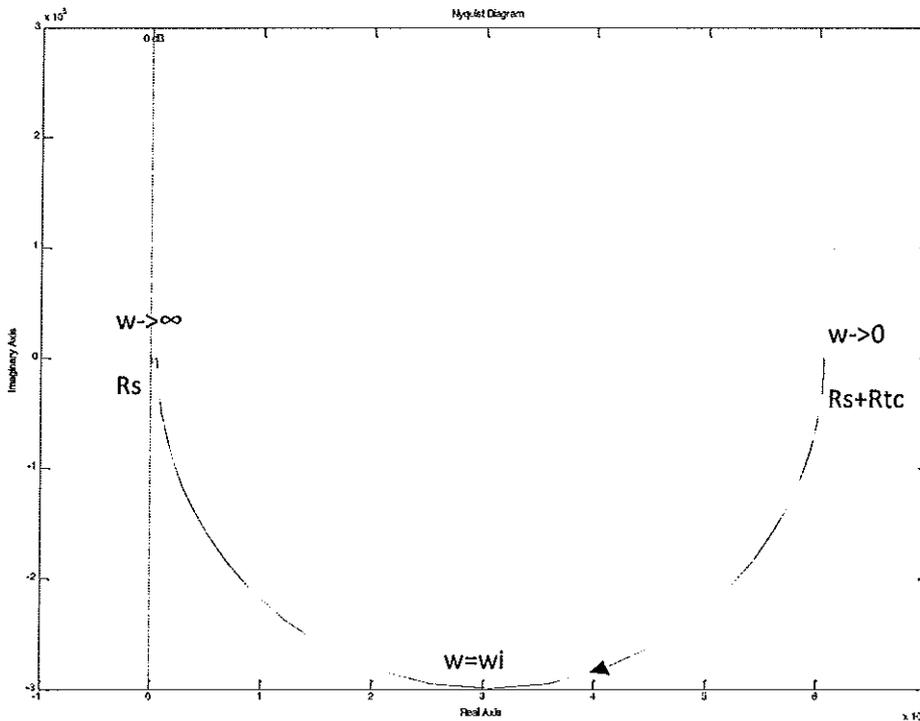
Q50 –  $Z_{\text{électrode}}(\omega)$  correspond à un 1/2 cercle de rayon  $R_{tc}/2$  et de centre  $(R_s + R_{tc}/2 ; 0)$  dans le plan  $(Z', Z'')$  = représentation de Nyquist

Q51 – pulsations limites

$\omega \rightarrow 0 : Z' \rightarrow R_s + R_{tc} ; Z'' \rightarrow 0$  et  $\omega \rightarrow \infty : Z' \rightarrow R_s ; Z'' \rightarrow 0$

Q52 – Pour  $\omega_1 = \frac{1}{R_{tc} \cdot C_i}$ , les impédances sont  $Z'(\omega_1) = R_s + R_{tc}/2$  et  $Z''(\omega_1) = -R_{tc}/2$

Diagramme Nyquist correspondant :



Q53 –  $f_1 = \frac{1}{2\pi R_{tc} C_i}$   $f_1 = 265\text{Hz}$  et  $|Z(\omega_1)| = 428\text{k}\Omega$

$$f_2 = \frac{1}{2\pi R_s C_i} = 26,5\text{kHz} (= 100x f_1) \text{ et } |Z(\omega_2)| = 8,53 \text{ k}\Omega$$

Q54 – non linearity  $\pm 0.1$  (9bits) = décalage par rapport à la courbe linéaire idéal de la sortie analogique Sanalog fonction de (code numérique d'entrée)

gain error  $\pm 0,3\%$  of FSR (Full Scale Range) = Sanalog – Sidéal, pour tous les bits à 1 (full scale)

resolution 10 bits = plus petite variation de la sortie analogique ( $V_{ref}/2^{10}$ )

Q55 – Impédance vue par la référence  $V_{ref}$  lorsque  $I_{out1}$  et  $I_{out2}$  sont reliées à un potentiel nul (masse ou masse virtuelle) =  $R = 10\text{k}\Omega$

Q56 – Un mot binaire N sur  $n=10$  bits s'écrit:  $N = b_{n-1} \cdot 2^{n-1} + \dots + b_1 \cdot 2 + b_0$

$$N_{max} = 2^n - 1 = 1023$$

$$Q57 - I_{out1} = \frac{V_{ref}}{2^n} \cdot \frac{N}{R} \quad \text{et} \quad I_{out2} = \frac{V_{ref}}{2^n} \cdot \frac{(N_{max}-N)}{R}$$

Q58 –  $I_{out1} + I_{out2} = V_{ref}/R = \text{constante}$  et  $I_{out1} - I_{out2} = 2I_{out1} - V_{ref}/R$  : sortie différentielle plus intéressante à exploiter

Q59 – à la saturation, on aura  $V_{DS} = V_{DSsat} = V_{GS} - V_T$  d'où l'expression du courant :

$$I_{Dsat} = \frac{W\mu_n C_i}{2L} \cdot (V_{GS} - V_T)^2 = \frac{Wk_n}{2L} \cdot (V_{GS} - V_T)^2$$

Et la transconductance :

$$g_m = \left. \frac{dI_D}{dV_{GS}} \right|_{saturation} = \frac{Wk_n}{L} \cdot (V_{GS} - V_T)$$

Q60. Il s'agit d'un miroir de courant classique :  $I_1 = I_{D1sat}$  et  $I_2 = I_{D2sat}$

$$I_{D1sat} = \frac{W_1 k_n}{2L_1} \cdot (V_{GS} - V_T)^2 \quad \text{et} \quad I_{D2sat} = \frac{W_2 k_n}{2L_2} \cdot (V_{GS} - V_T)^2$$

Donc on a bien la relation demandée :

$$\frac{I_{D2sat}}{I_{D1sat}} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{W_2/L_2}{W_1/L_1}$$

Q61. Application numérique :  $I_1 = I_{D1sat} = 100\mu\text{A}$  impose  $(V_{GS} - V_T)^2 = 1$  ; on élimine la solution  $V_{GS} = 0$  pour garder T2 saturé donc  $V_{GS} = 2\text{V}$

Comme  $V_{DD} = R \cdot I_1 + V_{GS}$  on trouve  $R = 30\text{k}\Omega$ .

Q62. Il faut que T2 soit saturé pour délivrer un courant  $I_{D2}$  constant :  $V_{GD2} < V_T$  d'où  $V_{D2min} = 1\text{V}$ .

**Corrigé de l'épreuve de conception préliminaire d'un système, d'un procédé  
ou d'une organisation**

Partie A - DIMENSIONNEMENT DE L'INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE

<p>Q1 – Potentiel photovoltaïque Energie annuelle produite = Surface x irradiation moyenne x nombre de jours x rendement <math>E_{\text{annuelle}} = 9 \cdot 9 \cdot 3,67 \cdot 365 \cdot 0,14 = 15,2 \text{MWh}</math></p>
<p>Q2 – Puissance crête <math>P_{\text{max}} = 36 \cdot 250 = 9 \text{kW}</math></p>
<p>Q3 – Signification des caractéristiques du PV <math>U_{\text{OC}}</math> : Tension à vide <math>I_{\text{CC}}</math> : Courant de court circuit <math>U_{\text{mpp}}</math> : Tension pour le point de puissance maximum <math>I_{\text{mpp}}</math> : Courant pour le point de puissance maximum Voir DR1</p>
<p>Q4 – Conditions de mesure Les grandeurs caractéristiques d'un PV sont réalisées dans des conditions de test standard à savoir : Irradiation de <math>1000 \text{W/m}^2</math> Température de <math>25^\circ\text{C}</math> Air masse de 1,5 La puissance maximale peut être dépassée si l'irradiation est <math>&gt; 1000 \text{W/m}^2</math> ou si la température devient <math>&lt; 25^\circ\text{C}</math>. On admet en général un dépassement possible de 25%.</p>
<p>Q5 – DR1</p>
<p>Q6 – DR2</p>
<p>Q7 – DR2</p>
<p>Q8 – Intérêt de plusieurs entrées MPPT Disposer de plusieurs entrées MPPT permet de connecter à un même onduleur plusieurs champs photovoltaïques de caractéristiques différentes : orientations, types et nombre de panneaux, tout en pouvant rechercher séparément le point de puissance maximal pour chaque champ.</p>
<p>Q9 – Différentes connexions possibles Plusieurs cas sont envisageables :</p> <p>(1) – 18 panneaux en série sur chaque onduleur (2 entrées MPPT sont utilisées)          → <math>U_{\text{oc}} = 18 \cdot 37,8 = 680 \text{V}</math> : Trop élevé peut passer au dessus de 700v si la température passe en dessous de <math>25^\circ\text{C}</math>          → <math>I_{\text{MPP}} = 8,25 \text{A}</math> : ok</p> <p>(2) – 9 panneaux en série sur une entrée MPPT d'un onduleur (2x2 entrées MPPT sont utilisées)          → <math>U_{\text{oc}} = 9 \cdot 37,8 = 340 \text{V}</math> : ok          → <math>I_{\text{MPP}} = 8,25 \text{A}</math> : ok</p>

(3) – 6 panneaux en série sur une entrée MPPT d'un onduleur 2x3 entrées MPPT sont utilisées

→  $U_{oc} = 6.37,8 = 227V$  : Tension trop proche de la limite basse de la plage de tracking du MPPT. Il peut y avoir des problèmes si la température  $> 25^{\circ}C$ .

→  $I_{MPP} = 8,25A$  : ok

La mise en parallèle de panneaux sur une entrée MPPT ne présente pas d'intérêt car il est plus intéressant d'utiliser toutes les entrées MPPT.

La solution retenue sera donc la solution (2). La puissance en entrée de chaque onduleur sera de :  $18 \cdot 250 = 4500W < 5400W$  autorisés

Q10 – Rôle de la diode Schottky

Cette diode Schottky aussi appelée diode de by-pass est là pour court-circuiter une série de cellules qui pourraient être ombrées ou moins irradiées.

C'est une diode Schottky en raison de la faible tension de seuil que propose cette technologie de diode limitant ainsi les pertes lorsque cette diode est passante.

Q11 – Caractéristique du panneau – DR3

Q12 – Caractéristique du panneau en présence d'ombrage – DR3

Q13 – Caractéristique  $p_{pv}(v_{pv})$  du panneau en présence d'ombrage – DR3

Q14 –  $I_0$  du modèle équivalent de la cellule

$$i_{cell} = I_{cc} - I_0 \left[ e^{\frac{v_{cell}}{\alpha}} - 1 \right] \text{ avec } \alpha = \frac{K \cdot T}{q} = 25mV \text{ et } I_{cc} = 8,3A \text{ donc } I_0 = 2,77 \cdot 10^{-10}A$$

Q15 – Point de fonctionnement des cellules ombrées et non ombrées

On appelle  $v_{cellombre}$  et  $i_{cellombre}$  la tension et le courant d'une cellule ombrée et  $v_{cell}$  et  $i_{cell}$  la tension et le courant d'une cellule non ombrée.

Il vient  $v_{cellombre} + 19v_{cell} = 0$  On considère la tension de seuil de la Schottky nulle

D'autre part,  $i_{cellombre} = i_{cell}$

$$\text{Donc : } I_{cc} - I_0 \left[ e^{\frac{v_{cell}}{\alpha}} - 1 \right] = I_{ccombre} - I_0 \left[ e^{\frac{v_{cellombre}}{\alpha}} - 1 \right]$$

$I_{ccombre} = 0,4I_{cc}$  (cellule ombrée à 60%) et  $v_{cellombre} = -19v_{cell}$

$$\text{D'où : } I_{cc} - I_0 \left[ e^{\frac{v_{cell}}{\alpha}} - 1 \right] = 0,4 \cdot I_{cc} - I_0 \left[ e^{\frac{-19v_{cell}}{\alpha}} - 1 \right]$$

$\approx 0$

Il vient :  $v_{cell} = 0,61V$  et  $i_{cell} \approx I_{ccombre} = 3,32A$

Q16 – Puissances dans les cellules

$$P_{cellombre} = -19 \cdot 0,61 \cdot 3,32 = -38,5W$$

$$P_{cell} = 0,61 \cdot 3,32 = 2,03W$$

La puissance fournie par les cellules non ombrée est absorbée par la cellule ombrée qui devient réceptrice. La puissance de 38,5W est relativement importante en raison du faible ombrage.

Lorsque celui-ci augmente le courant de court-circuit baisse diminuant la puissance dissipée. Sans diode de by-pass cette puissance aurait été plus importante et aurait pu conduire à la destruction de la cellule ombrée.

Q17 – Tension inverse sur la cellule ombrée

$$V_{\text{cellombre}} = -19,0,61 = -11,6V$$

Dans ce cas (20 cellules) cette tension resta assez éloignée de la tension de claquage inverse. Toutefois, on voit que l'on ne pourrait pas se contenter d'une diode par panneau.

## Partie B - ONULEUR PHOTOVOLTAIQUE

Q18 – Allure des tensions – DR5

Q19 – Loi de variation de  $\beta(\omega t)$  et expression de  $\langle v_c(\omega t) \rangle$

$$\beta(\omega t) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \frac{\hat{m}}{\hat{r}ig} \sin(\omega t) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} r \cdot \sin(\omega t)$$

$$\langle v_c(\omega t) \rangle = \beta(\omega t) \cdot \frac{E_c}{2} - (1 - \beta(\omega t)) \frac{E_c}{2} = \frac{E_c}{2} r \cdot \sin(\omega t)$$

Q20 – Valeur minimale de  $E_c$

$$\langle v_c(\omega t) \rangle = 230\sqrt{2} \cdot \sin(\omega t)$$

$$r_{\text{max}} = 1$$

$$\text{donc } E_c \geq 2 \cdot 230\sqrt{2} = 650V$$

Q21 – Profondeur de modulation pour  $E_c = 800V$

$$r = 0,81$$

Q22 –  $i_{TA}$  et  $i_{DA}$  – DR6

Q23 – Démontrer que :

$$\langle i_{TA} \rangle = \hat{i}_{SR} \cdot \left( \frac{r}{8} + \frac{1}{2\pi} \right), I_{TA\text{eff}} = \hat{i}_{SR} \cdot \sqrt{\frac{1}{8} + \frac{r}{3\pi}}$$

$$\langle i_{DA} \rangle = \hat{i}_{SR} \cdot \left( -\frac{r}{8} + \frac{1}{2\pi} \right), I_{DA\text{eff}} = \hat{i}_{SR} \cdot \sqrt{\frac{1}{8} - \frac{r}{3\pi}}$$

Sur une période de découpage on considère que  $i_{SR}$  est constant donc :

$$i_{TA}(\omega t) = \beta(\omega t) i_{SR}(\omega t)$$

donc :

Dans le transistor :

$$\langle i_{TA} \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \beta(\omega t) \cdot i_{SR}(\omega t) \cdot d\omega t = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \frac{1}{2} (1 + r \cdot \sin(\omega t)) \cdot \hat{i}_{SR} \cdot \sin(\omega t) \cdot d\omega t$$

$$\langle i_{TA} \rangle = \hat{i}_{SR} \cdot \left( \frac{r}{8} + \frac{1}{2\pi} \right)$$

De la même façon

$$I_{TA\text{eff}}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \beta(\omega t) (i_{SR}(\omega t))^2 \cdot d\omega t = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \left( \frac{1}{2} (1 + r \cdot \sin(\omega t)) \cdot \hat{i}_{SR} \cdot \sin(\omega t) \right)^2 \cdot d\omega t = \frac{1}{4\pi} \hat{i}_{SR}^2 \cdot \left( \frac{\pi}{2} + \frac{4}{3} r \right)$$

$$\text{donc } I_{TAeff} = \hat{i}_{SR} \cdot \sqrt{\frac{1}{8} + \frac{r}{3\pi}}$$

Dans la diode :

$$\langle i_{DA} \rangle = -\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi (1 - \beta(\omega t)) \cdot i_{SR}(\omega t) \cdot d\omega t \quad \text{donc } \langle i_{DA} \rangle = -\hat{i}_{SR} \cdot \left( -\frac{r}{8} + \frac{1}{2\pi} \right)$$

$$I_{DAeff}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi (1 - \beta(\omega t)) (i_{SR}(\omega t))^2 \cdot d\omega t = \frac{1}{4\pi} \hat{i}_{SR}^2 \cdot \left( \frac{1}{2\pi} - \frac{4}{3}r \right) \quad \text{donc } I_{DAeff} = \hat{i}_{SR} \cdot \sqrt{\frac{1}{8} - \frac{r}{3\pi}}$$

$$\hat{i}_{SR} = \sqrt{2} \cdot \frac{5000}{230} = 30,7A$$

$$\langle i_{TA} \rangle = 8A, I_{TAeff} = 14,1A$$

$$\langle i_{DA} \rangle = 1,77A, I_{DAeff} = 6,1A$$

Q24 – Contraintes sur les interrupteurs – DR7

Q25 – Courants  $i_{C1}$  et  $i_{C2}$  – DR8

Q26 – Valeur des capacités  $C_1$  et  $C_2$

$$i_{Ci} = C_i \frac{dv_{Ci}}{dt} = \frac{\hat{i}_{SR}}{2} \sin(\omega t) \quad \text{pour } i=1..2$$

$$\Rightarrow v_{Ci} = \frac{\hat{i}_{SR}}{2C_i\omega} \cos(\omega t)$$

$$\Rightarrow \Delta v_{Ci} = \frac{\hat{i}_{SR}}{C_i\omega} = 0,05 \frac{800}{2} = 20V$$

$$\Rightarrow C_1 = C_2 = 4900\mu F$$

Q27 – Expression de l'ondulation de courant dans l'inductance du filtre de sortie de l'onduleur

$$\langle v_{SR}(\omega t) \rangle = E_c \left( \beta(\omega t) - \frac{1}{2} \right)$$

$$L_s \cdot \Delta i_{LS} = \left( \frac{E_c}{2} - \langle v_{SR}(\omega t) \rangle \right) \cdot \Delta T$$

$$\Delta i_{LS} = \frac{E_c}{L_s F_{Do}} (1 - \beta(\omega t)) \beta(\omega t)$$

Q28 – Valeur de l'inductance du filtre limitant l'ondulation à 5% du courant crête

$\Delta i_c$  est maximale pour  $\beta(\omega t) = 0,5$

$$\Delta i_{cmax} = \frac{E_c}{L_s F_{Do}} \cdot \frac{1}{4} = 30,7 \cdot 0,05 = 1,5A$$

$$L_s = 6,7mH$$

Q29 – Fonction de transfert du filtre de sortie et valeur de  $C_s$

$\frac{i_{SR}(p)}{v_c(p)} \approx \frac{1}{L_r p} \frac{1}{1 + C_s L_s p^2}$ <p>La fréquence naturelle de ce filtre est <math>F_n = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{C_s L_s}} = 2\text{kHz} \Rightarrow C_s = 945\text{nF}</math></p>
<p>Q30 – Pertes par conduction dans les diodes les IGBT de l'onduleur – DR7  D'après la figure 6 de l'annexe 3 (documentation IHW40T120) :  <math>V_{CE0} = 0,9\text{V}</math> et <math>r_{Ti} = 35\text{m}\Omega</math>  D'après la figure 27 de l'annexe 3  <math>V_{D0} = 1\text{V}</math> et <math>r_{Td} = 40\text{m}\Omega</math>  <math>P_{\text{condIGBT}} = V_{CE0} \langle I_{TA} \rangle + r_{Ti} I_{TA\text{eff}}^2 = 14,15\text{W}</math>  <math>P_{\text{condDiode}} = V_{D0} \langle I_{DA} \rangle + r_{Td} I_{DA\text{eff}}^2 = 3,26\text{W}</math></p>
<p>Q31 – Energie de commutation  Pour <math>I_C</math> compris entre 10 et 40A on peut approximer <math>E_{TS}(I_C)</math> à une droite passant par l'origine (Figure 13 annexe 3) dont on peut considérer <math>E_{TS}</math> proportionnelle à <math>I_C</math>. Le coefficient de proportionnalité est alors :  <math>K_{E/I} = 0,25\text{mJ/A}</math> à 600V  La figure 16 de l'annexe 3 nous montre que <math>E_{TS}</math> est proportionnel à la tension <math>V_{CE}</math>  <math>K_{E/V} = 19\mu\text{J/V}</math> à 40A</p>
<p>Q32 – Energie de commutation proportionnelle au courant moyen commuté  Sur une période de commutation <math>E_{\text{comTD0}} = K_{E/I} \cdot \langle i_{LS}(t) \rangle_{TD0} \cdot \frac{800}{600}</math>  Sur une période de commutation basse fréquence <math>E_{\text{comTr}} = \int_0^{\frac{T_r}{2}} K_{E/I} \cdot \langle i_{LS}(t) \rangle_{TD0} \cdot \frac{800}{600} \cdot F_{D0} dt</math>  <math display="block">E_{\text{comTr}} = K_{E/I} \frac{F_{D0}}{F_r} \cdot \frac{800}{600} \cdot \frac{1}{T_r} \int_0^{\frac{T_r}{2}} \langle i_{LS}(t) \rangle_{TD0} dt = K_{E/I} \frac{F_{D0}}{F_r} \cdot \frac{800}{600} \cdot \langle i_{LS} \rangle_{Tr}</math> L'énergie de commutation est bien proportionnelle au courant moyen commuté <math>\langle i_{LS} \rangle_{Tr}</math>.</p>
<p>Q33 – Pertes par commutation d'un ensemble IGBT + Diode  <math>P_{\text{com}} = F_r \cdot E_{\text{com}} = 65\text{W}</math></p>
<p>Q34 – Pertes totales  <math>P_{\text{Totale}} = (14,15 + 3,2 + 65)2 = 165\text{W}</math>  <math>\eta = \frac{5000}{5165} = 96,8\%</math></p>
<p>Q35 – Inductance <math>L_{Ei}</math> permettant de limiter l'ondulation du courant d'entrée  <math>L_{Ei} \cdot \Delta I_{MPPi} = E_{MPPi} \cdot \alpha_{MPPi} \cdot T_{D0}</math> donc <math>L_{Ei} = \frac{E_c (1 - \alpha_{MPPi}) \alpha_{MPPi}}{\Delta I_{MPPi} \cdot F_{D0}}</math>  On se place à <math>\alpha_{MPPi} = 0,5 \Rightarrow E_{MPPi} = 400\text{V}</math>  On obtient alors <math>L_{Ei} = 10\text{mH}</math> pour <math>\Delta I_{MPPi} = 1\text{A}</math></p>
<p>Q36 – Courant d'entrée <math>I_{MPPi}</math> et rapport cyclique <math>\alpha_{MPPi}</math>  <math>E_{MPPi} = 450\text{V}</math> donc <math>\alpha_{MPPi} = 0,4375</math>  <math>\Delta I_{MPPi} = 0,98\text{A}</math> et <math>\langle i_{MPPi} \rangle = 4\text{A}</math> on est en conduction continue.</p>

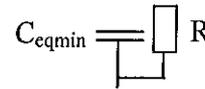
<p>Q37 – Courants <math>I_{TEi}</math> et <math>I_{DEi}</math></p> $\langle i_{TEi} \rangle = \alpha_{MPPi} \cdot \langle i_{MPPi} \rangle = 1,75A$ $\langle i_{DEi} \rangle = (1 - \alpha_{MPPi}) \cdot \langle i_{MPPi} \rangle = 2,1A$ <p>En considérant l'ondulation de courant pour le calcul des valeurs efficaces il vient :</p> $I_{TEieff} = \sqrt{\alpha_{MPPi} \left( I_0^2 + I_0 \cdot \Delta I_{MPPi} + \frac{\Delta I_{MPPi}^2}{3} \right)} = 2,65A \text{ où } I_0 \text{ est la valeur de } I_{MPPi} \text{ en début de période}$ $I_{DEieff} = \sqrt{(1 - \alpha_{MPPi}) \left( I_0^2 + I_0 \cdot \Delta I_{MPPi} + \frac{\Delta I_{MPPi}^2}{3} \right)} = 3A$
<p>Q38 – Pertes dans les IGBT et dans les diodes</p> $P_{condIGBT} = V_{CE0} \cdot \langle I_{TEi} \rangle + r_{Tt} \cdot I_{TEieff}^2 = 2,45W$ $P_{condDiode} = V_{D0} \cdot \langle I_{DEi} \rangle + r_{Td} \cdot I_{DEieff}^2 = 2,34W$ $P_{Commut} = 2mJ \cdot 20kHz = 40W$ <p>Pertes totales = <math>3(2,45 + 2,34 + 40) = 134W</math></p>
<p>Q39 – Pertes dans les inductances <math>L_{EI}</math></p> $P_L = R_{DC} \cdot \langle I_{DC} \rangle^2 + R_{AC} \cdot I_{ACeff}^2$ $\langle I_{DC} \rangle = \langle I_{MPPi} \rangle = 4A$ $I_{AC} = \Delta I_{MPPi} \cdot \frac{1}{2\sqrt{3}} = 4A \text{ Valeur efficace d'un signal triangulaire d'amplitude } \Delta I_{MPPi}$ <p><math>P_L = 1W</math></p>
<p>Q40 – Pertes et rendement de l'onduleur</p> <p>Pertes = <math>134 + 3 + 165 = 303W</math></p> <p><math>\eta = 94,3\%</math></p>

Partie C – PACK BATTERIE et BMS

<p>Q41 – Constitution du pack batterie</p> <p>La capacité <math>C</math> d'un élément de la figure 6 est <math>C = 100Ah</math></p> <p>Soit une énergie stockée de <math>3,2 \cdot 100 = 320Wh</math></p> <p>Il faudra donc 16 éléments de ce type pour réaliser une batterie de 5kWh.</p> <p>Afin d'obtenir une tension d'environ 24V on place 8 éléments de ce type en parallèle avec 8 autres. La tension sera alors de 25,6V</p>
<p>Q42 – Capacité équivalente <math>C_{eq}</math> à un élément</p> $Q = C_{eq} \cdot \Delta U$ $\Delta U = 3,6 - 3,35 = 0,25V$ $Q = i \cdot t = 0,8 \cdot 100 = 80Ah \text{ soit } 288kCoulomb$ $C_{eq} = \frac{288 \cdot 10^3}{0,25} = 1,15 \cdot 10^6 F$
<p>Q43 – Résistance d'équilibrage</p> <p>L'écart maximal entre 2 cellules est de 10%</p> <p>Soit <math>C_{eqmax} = 1,27 \cdot 10^6 F</math> et <math>C_{eqmin} = 1,09 \cdot 10^6 F</math></p> <div style="text-align: center;"> </div>

Pour que l'on est le même  $\Delta V$  sur les deux éléments il faut :

$$I_R = C_{eq\max} \frac{\Delta V}{\Delta T} = C_{eq\min} \frac{\Delta V}{\Delta T}$$



$$I_R = (C_{eq\max} - C_{eq\min}) \frac{0,3C}{C_{eq\max}} = \left(1 - \frac{0,95}{1,05}\right) \cdot 0,3C = 2,86A$$

$$R = \frac{U_{cell}}{I_R} = 1,22\Omega$$

Q44 – Energie perdue dans R

Puissance dans R :  $P_R = R \cdot I_R^2 = 10W$

Energie dissipée dans R :  $E_R = P_R \cdot T_{charge}$ .  $T_{charge}$  : temps de charge de la batterie et de mise en service de la résistance

$$I_{charge} = 0,3C = 30A = C_{eq\max} \frac{\Delta U}{T_{charge}} = C_{eq\max} \frac{3,65 - 3,5}{T_{charge}}$$

d'où :  $T_{charge} = 1,76h$  et  $E_R = 63kJ = 17,6Ah$

Q45 – Energie récupérée lors de la décharge

C'est l'élément le plus faible qui va se décharger le plus vite. Lorsque celui-ci sera déchargé il ne sera plus possible d'utiliser la batterie. On ne pourra donc récupérer que  $0,95 \cdot C$  par élément soit  $320 \cdot 0,95 \cdot 16 = 4864Wh$

Q46 – Tension  $U_{Co}$  aux bornes de  $C_o$

$$i_{Co} = \sum i_{Si} = \sum \frac{U_{ci} - U_{Co}}{R_S} = 0 \text{ donc } \sum (U_{ci} - U_{Co}) = 0 \text{ or } \sum U_{ci} = N \cdot U_{Co} \text{ avec } N \text{ nombre d'éléments}$$

d'où  $U_{Co} = \frac{\sum U_{ci}}{N}$  = valeur moyenne des  $U_{ci}$

Q47 – Puissance échangée

$$P_i = U_{ci} \cdot i_{Si} = U_{ci} \frac{U_{ci} - U_{Co}}{R_S} = \underbrace{\frac{(U_{ci} - U_{Co})^2}{R_S}}_{\text{Pertes}} + \underbrace{U_{Co} \frac{U_{ci} - U_{Co}}{R_S}}_{\text{Puissance délivrée à } C_o}$$

Q48 – Equilibrage naturel

Si  $U_{ci} > U_{Co}$  alors  $P_i > 0$ , si  $U_{ci} < U_{Co}$  alors  $P_i < 0 \Rightarrow$  on a un transfert d'énergie du plus chargé vers le moins chargé. Il y a donc un équilibrage naturel entre les cellules.

Q49 – Fonctionnement lors d'une dispersion de  $\pm 5\%$  entre les cellules

On est dans les mêmes conditions que pour la question Q43.

Pour le convertisseur relié à l'élément le plus faible

$$i_{Si} = -\left(0,3C - \frac{C_{\min}}{C_{\max}} \cdot 0,3C\right) = -0,029C = -2,9A$$

Pour les autres convertisseurs  $i_{Si} = \frac{0,029C}{N} = 0,36A$

Q50 – Ce fonctionnement est possible lors de la décharge. L'énergie récupérée est alors la somme de toutes les énergies stockées moins les pertes.

Si le rendement des convertisseurs est de 90% alors les pertes dans ces convertisseurs sera de  $0,9^2$  énergie échangée entre les éléments.

Cette énergie échangée est de 10% de 100C soit 10C

Les pertes sont donc de  $10C \cdot 0,9^2 = 8,1C$

L'énergie récupérée est alors de  $(N-1)105C + 95C - 8,1C$

Partie D – CONVERTISSEUR DAB

Q51 – Allure des courants et tensions dans le transformateur – DR9

Q52 – Expression du courant  $i_{lf}(t)$

En prenant  $m = \frac{\text{tension primaire}}{\text{tension secondaire}}$

$$v_{lf}(t) = v_e(t) - m \cdot v_s(t) \text{ et } v_{lf}(t) = L_f \frac{di_{lf}(t)}{dt} \quad 0 \leq t \leq \delta T_d : i_{lf}(t) = i_{lf}(0) + \frac{V_e + mV_s}{L_f} \cdot t,$$

$$i_{lf}(\delta T_d) = i_{lf}(0) + \frac{V_e + mV_s}{L_f} \cdot \delta T_d$$

$$\delta T_d \leq t \leq \frac{T_d}{2} : i_{lf}(t) = i_{lf}(\delta T_d) + \frac{V_e - mV_s}{L_f} \cdot (t - \delta T_d),$$

$$i_{lf}\left(\frac{T_d}{2}\right) = i_{lf}(0) + \frac{T_d}{L_f} \left( \frac{1}{2} V_e + mV_s \left( 2\delta - \frac{1}{2} \right) \right)$$

$$\frac{T_d}{2} \leq t \leq \frac{T_d}{2} + \delta T_d : i_{lf}(t) = i_{lf}\left(\frac{T_d}{2}\right) + \frac{V_e + mV_s}{L_f} \cdot \left( t - \frac{T_d}{2} \right),$$

$$i_{lf}\left(\frac{T_d}{2} + \delta T_d\right) = i_{lf}(0) + \frac{T_d}{L_f} \left( V_e \left( \frac{1}{2} - \delta \right) + mV_s \left( \delta - \frac{1}{2} \right) \right)$$

$$\frac{T_d}{2} + \delta T_d \leq t \leq T_d : i_{lf}(t) = i_{lf}\left(\frac{T_d}{2} + \delta T_d\right) - \frac{V_e - mV_s}{L_f} \cdot \left( t - \frac{T_d}{2} - \delta T_d \right), \quad i_{lf}(T_d) = i_{lf}(0)$$

Q53 – Valeur moyenne et condition initiale de  $i_{lf}$

$$\langle i_{lf} \rangle = 0 \Rightarrow i_{lf}(0) = -i_{lf}\left(\frac{T_d}{2}\right) = -\frac{T_d}{2L_f} \left( \frac{1}{2} V_e + mV_s \left( 2\delta - \frac{1}{2} \right) \right)$$

Q54 – Allure des courants d'entrée et de sortie du convertisseur DAB – DR11

Q55 – Valeurs moyennes des courants d'entrée et de sortie du DAB

$$\langle i_e \rangle = 2 \left( \frac{i_{lf}(0) + i_{lf}(\delta T_d)}{2} \cdot \delta + \frac{i_{lf}(\delta T_d) + i_{lf}\left(\frac{1}{2} - \delta\right)}{2} \left( \frac{1}{2} - \delta \right) \right)$$

$$\langle i_e \rangle = \frac{2T_d}{L_f} mV_s \delta \left( \frac{1}{2} - \delta \right)$$

De la même façon on trouve :

$$\langle i_s \rangle = \frac{2T_d}{L_f} mV_e \delta \left( \frac{1}{2} - \delta \right)$$

On vérifie que  $P_e = P_s$  ce qui est normal car il n'y a pas de pertes dans cette étude.

Q56 – Puissance transmise  $P_{DAB}$

$$P_{DAB} = V_e \langle i_e \rangle = V_s \langle i_s \rangle = \frac{2T_d}{L_f} mV_s \cdot V_e \left( \delta \left( \frac{1}{2} - \delta \right) \right)$$

Cette puissance est nulle pour  $\delta = 0$  et  $\delta = \frac{T_d}{2}$  et maximale pour  $\delta = \frac{T_d}{4}$   
 $P_{DABMax} = \frac{0,125T_d}{L_f} m' V_s \cdot V_e$  La puissance maximale dépend du rapport  $\frac{T_d}{L_f}$ .

#### Q57 – Réversibilité

Ce convertisseur est symétrique et  $\delta$  peut varier de  $-\frac{T_d}{2}$  à  $\frac{T_d}{2}$ . Des valeurs de  $\delta < 0$  reviennent à permuter  $V_s$  et  $V_e$  dans les calculs précédents.

#### Q58 – Valeur de $L_f$

Dans le pire cas  $V_e = V_s = 2,4V$

$$\langle i_e \rangle = 2A \Rightarrow P = 4,8W = P_{DABMax} = \frac{0,125T_d}{L_f} m' V_s \cdot V_e$$

$$L_{fmax} = 300nH \text{ pour } F_d = 500kHz$$

#### Q59 – Point de fonctionnement

$$L_f = 100nH, m' = 1, P = 6W \Rightarrow \delta = 0,036$$

$$i_{lf}(0) = -2,16A$$

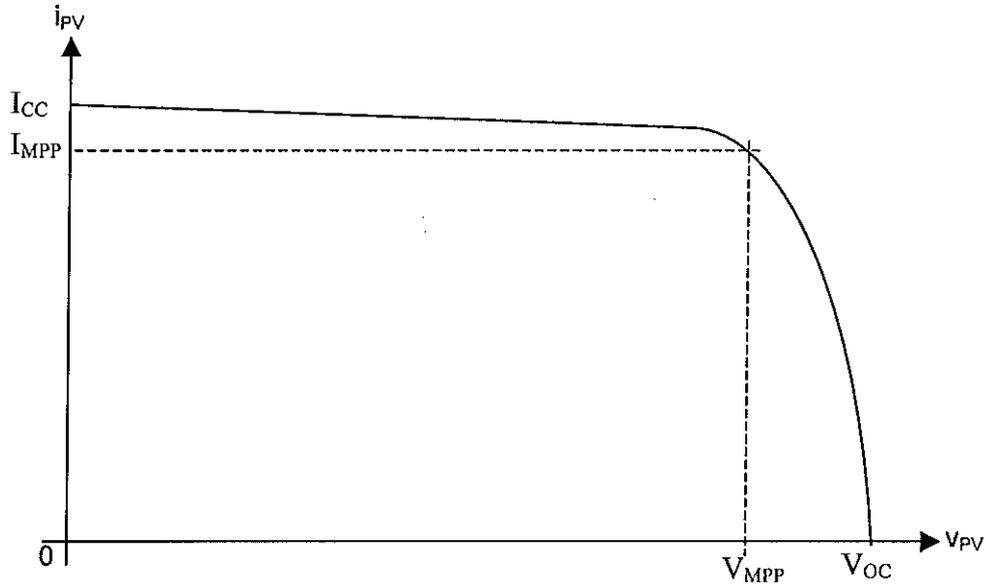
$$I_{lfaff}^2 = \frac{2}{T_d} \left[ \int_0^{\delta T_d} \left( i_{lf}(0) - \frac{2i_{lf}(0)}{\delta T_d} t \right)^2 dt + \int_{\delta^* T_d}^{T_d} (-i_{lf}(0))^2 dt \right]$$

$$I_{lfaff} = 3,01A = I_{1eff} = I_{2eff}$$

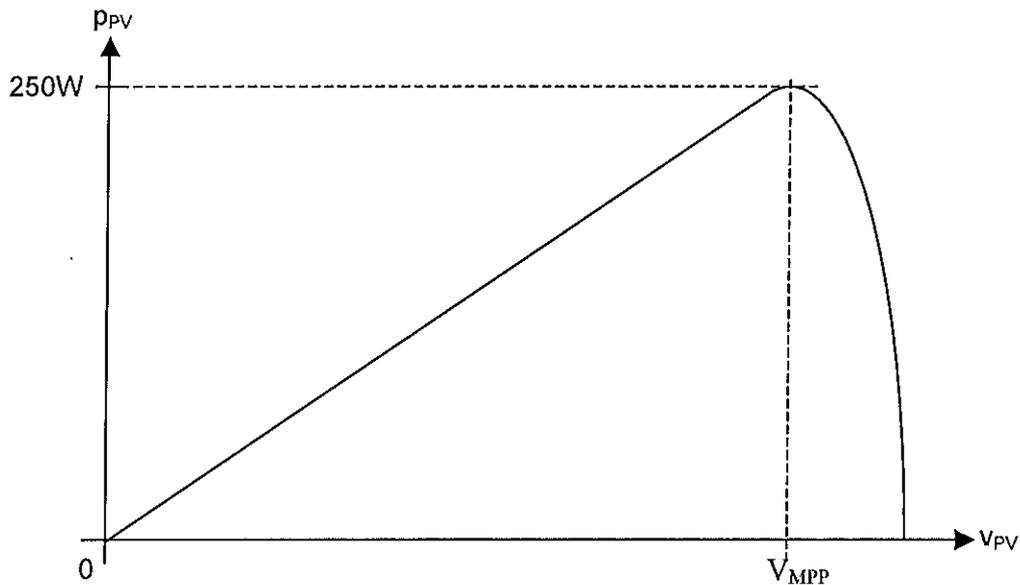
## Documents réponses

DR1 Caractéristique d'un panneau photovoltaïque SW 250 mono

Q3 : Caractéristique nominale  $i_{PV}(v_{PV})$  d'un panneau photovoltaïque SW 250 mono



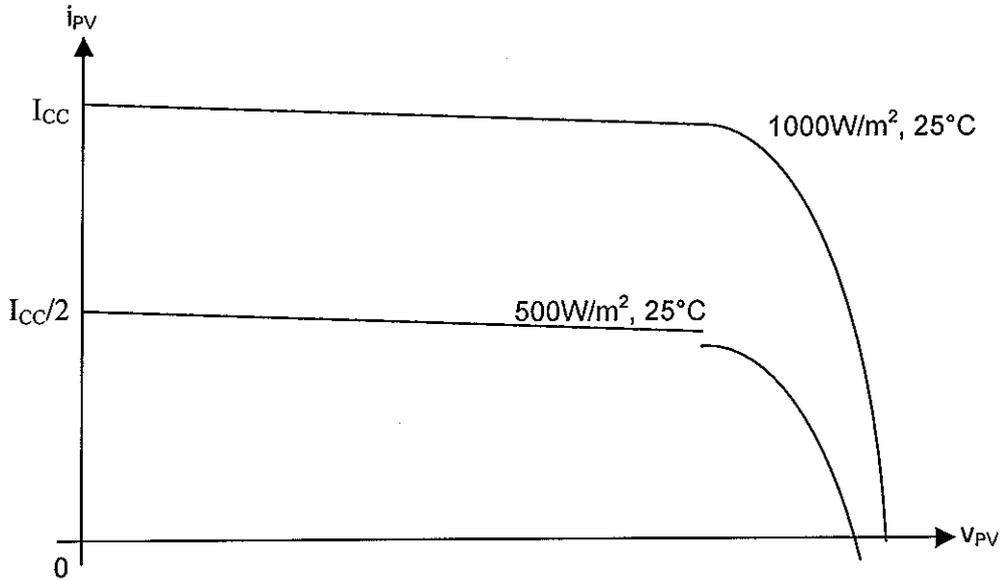
Q5 : Caractéristique nominale  $p_{PV}(v_{PV})$  d'un panneau photovoltaïque SW 250 mono



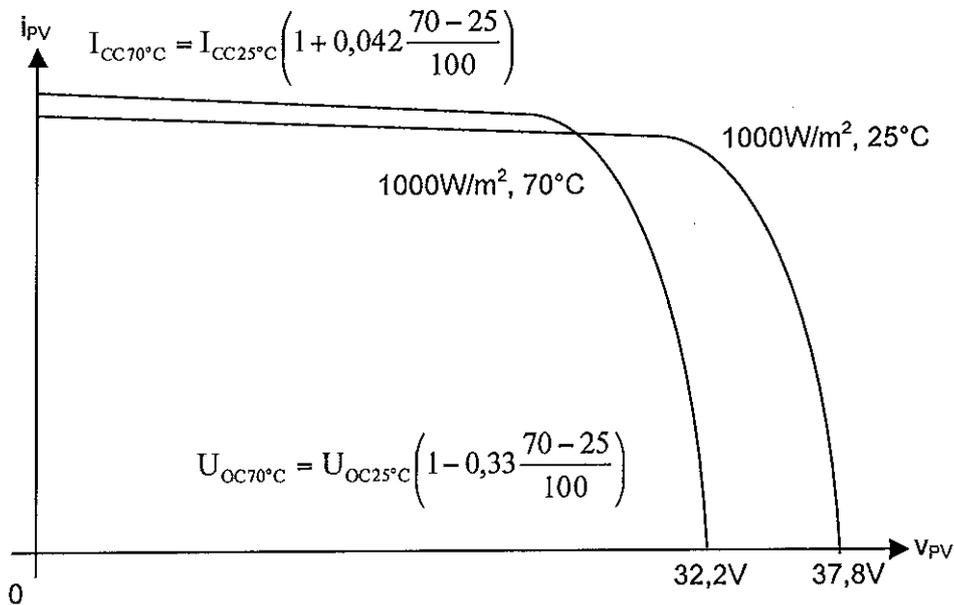
DR2 Page 1/2 Caractéristique d'un panneau photovoltaïque SW 250 mono

Q6 : Evolution des caractéristiques d'un panneau photovoltaïque SW 250 mono en fonction de l'irradiation et de la température.

Courbe a : Irradiation diminuée de 50%

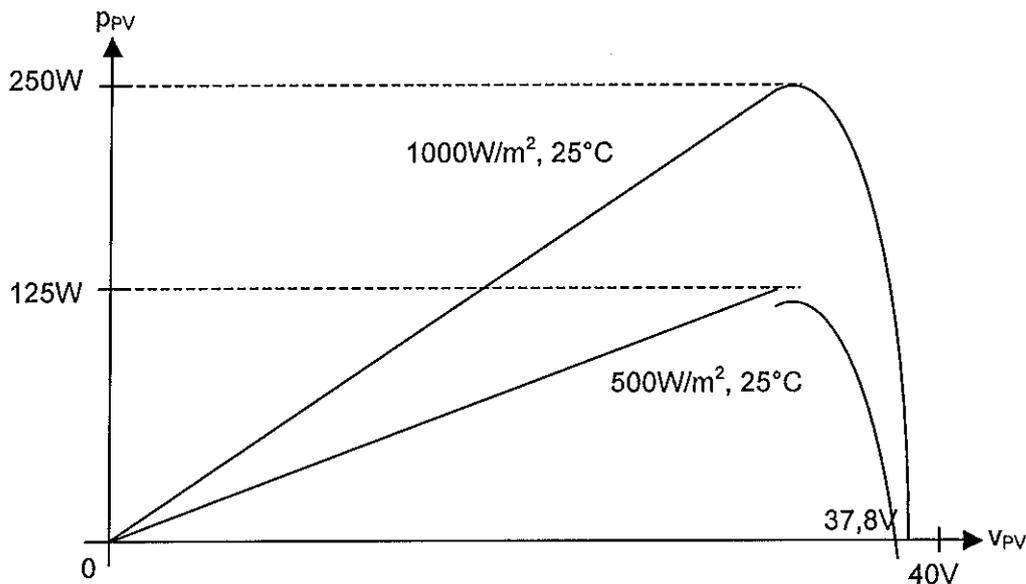


Courbe b : Température augmente à 70°C

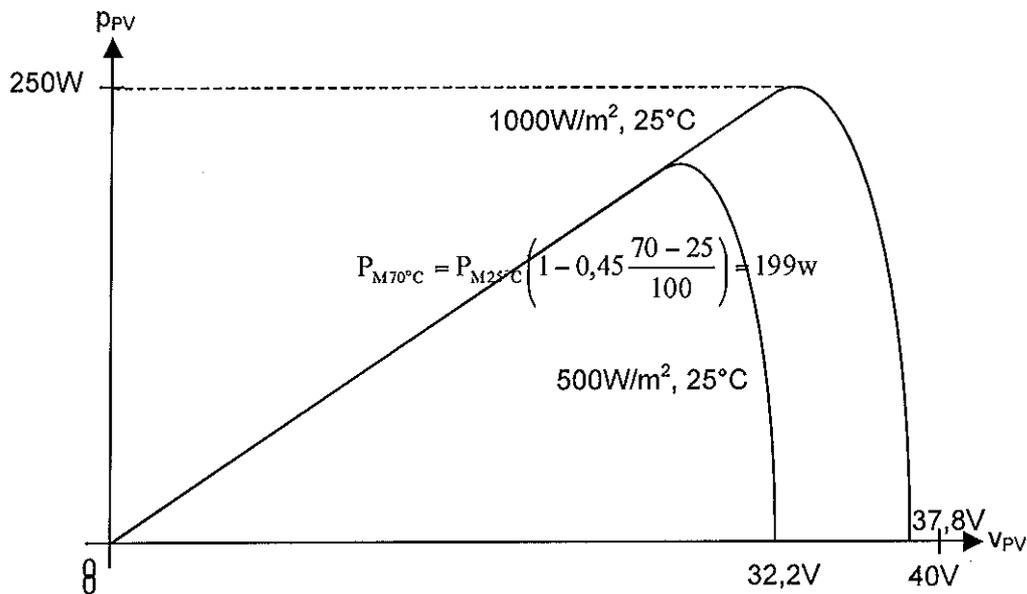


Q7 : Evolution de la caractéristique  $p_{PV}(V_{PV})$  :

Courbes c : Irradiation de 100% ( $1000W/m^2$ ) puis 50%



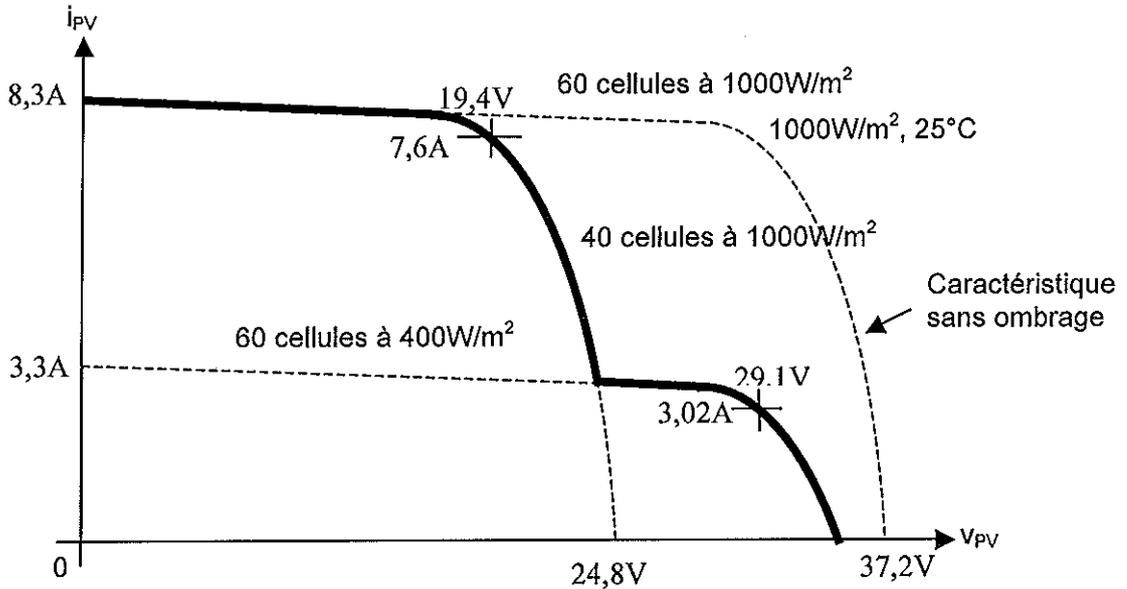
Courbes d : Température de  $25^\circ C$  puis de  $70^\circ C$



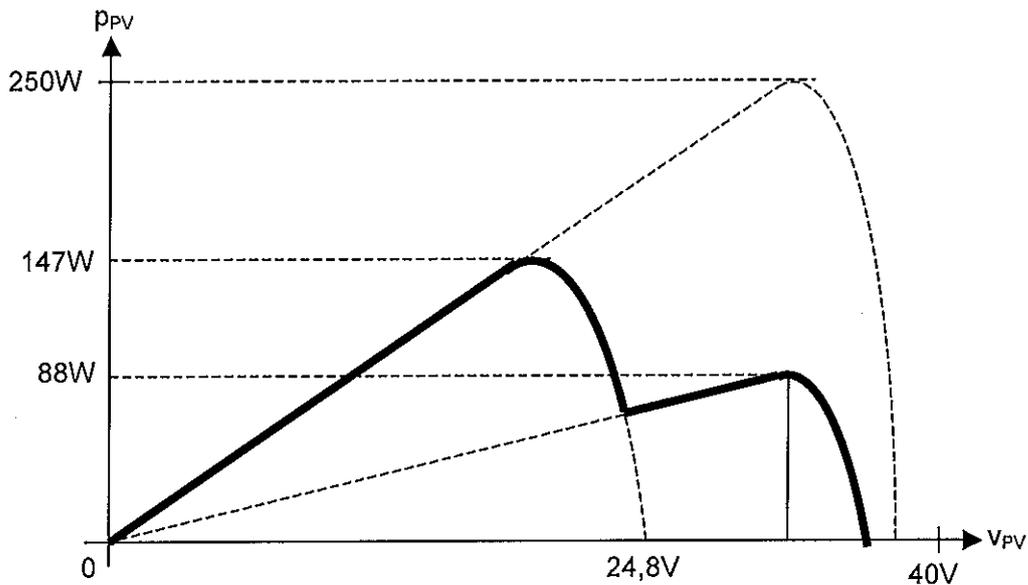
DR3 Effet des ombrages

Q11 : Caractéristique  $i_{PV}(v_{PV})$  d'un panneau photovoltaïque sans ombrage

Q12 : Caractéristique  $i_{PV}(v_{PV})$  d'un panneau photovoltaïque avec une cellule masquée à 60 %



Q13 : Caractéristique  $p_{PV}(v_{PV})$  d'un panneau photovoltaïque avec une cellule masquée à 60%



**DR4** Fonctionnement d'une branche de panneau photovoltaïque en présence d'ombrage.

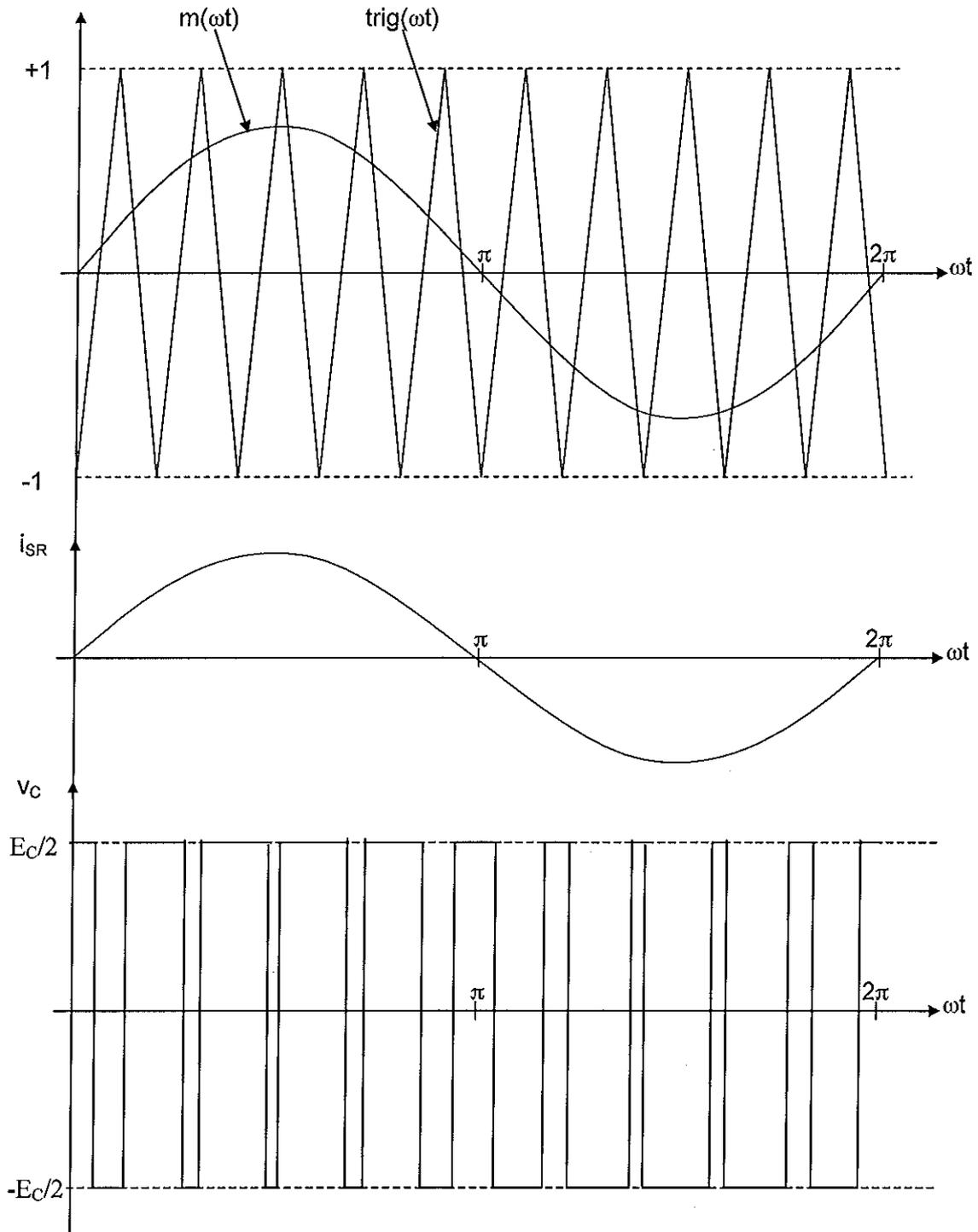
**Q15** : Tensions et courants traversant les cellules en présence d'ombrage lorsque la branche est court-circuitée.

**Q16** : Puissances fournies par les cellules en présence d'ombrage lorsque la branche est court-circuitée.

	<b>Cellule ombrée à 60%</b>	<b>Cellule éclairée à 100%</b>
<b><math>V_{cell}</math></b>	<b>-11,6V</b>	<b>0,61V</b>
<b><math>I_{cell}</math></b>	<b>3,32A</b>	<b>3,32A</b>
<b><math>P_{cell}</math></b>	<b>-38,5W</b>	<b>2,03W</b>

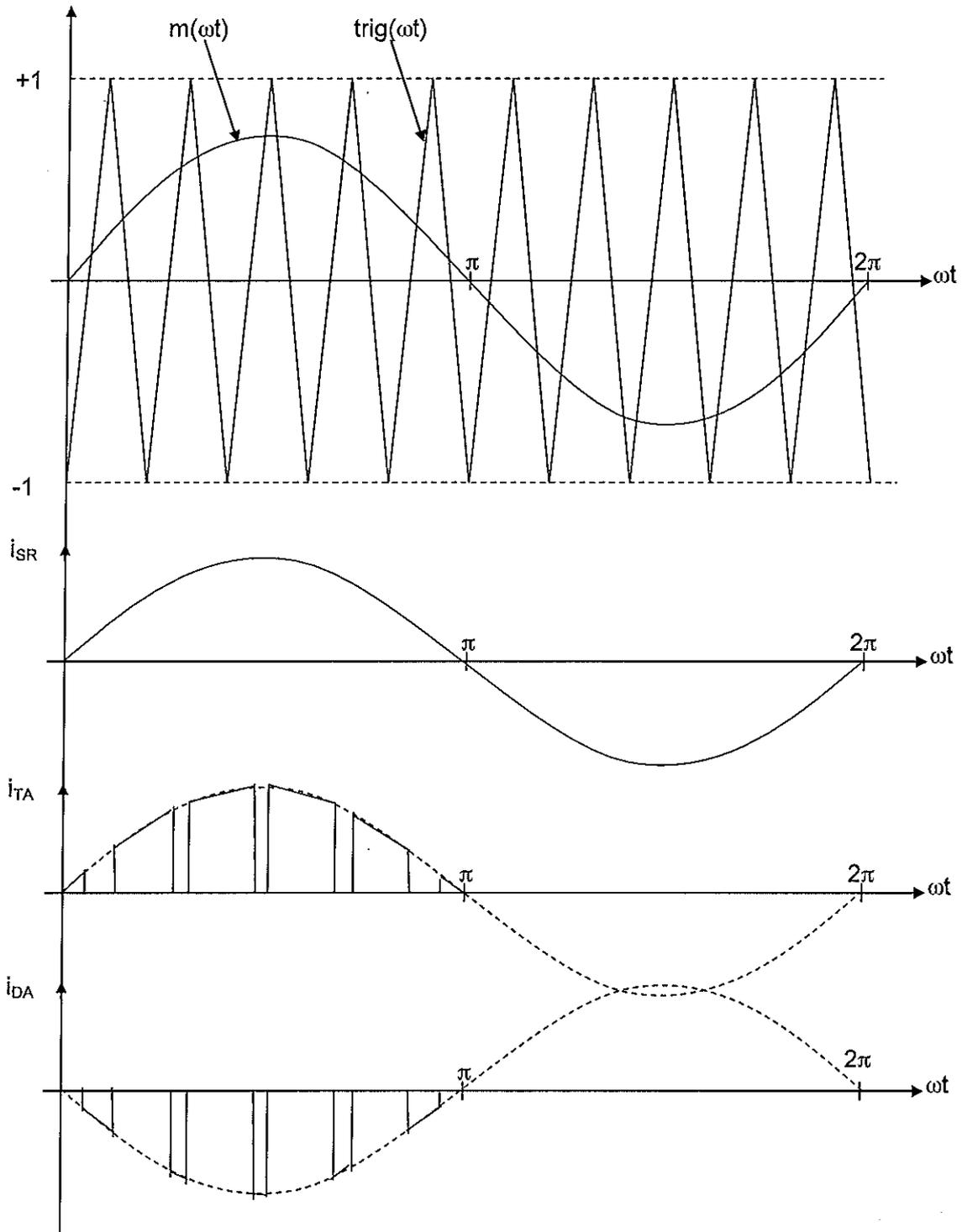
DR5 Onduleur MLI

Q18 : tracé de  $v_c(\omega t)$



DR6 Onduleur MLI

Q22 : Courants dans  $T_A$  et  $D_A$ .



DR7 : Onduleur MLI

Q24 : Contraintes sur les interrupteurs de l'onduleur

Q30 : Pertes par conduction

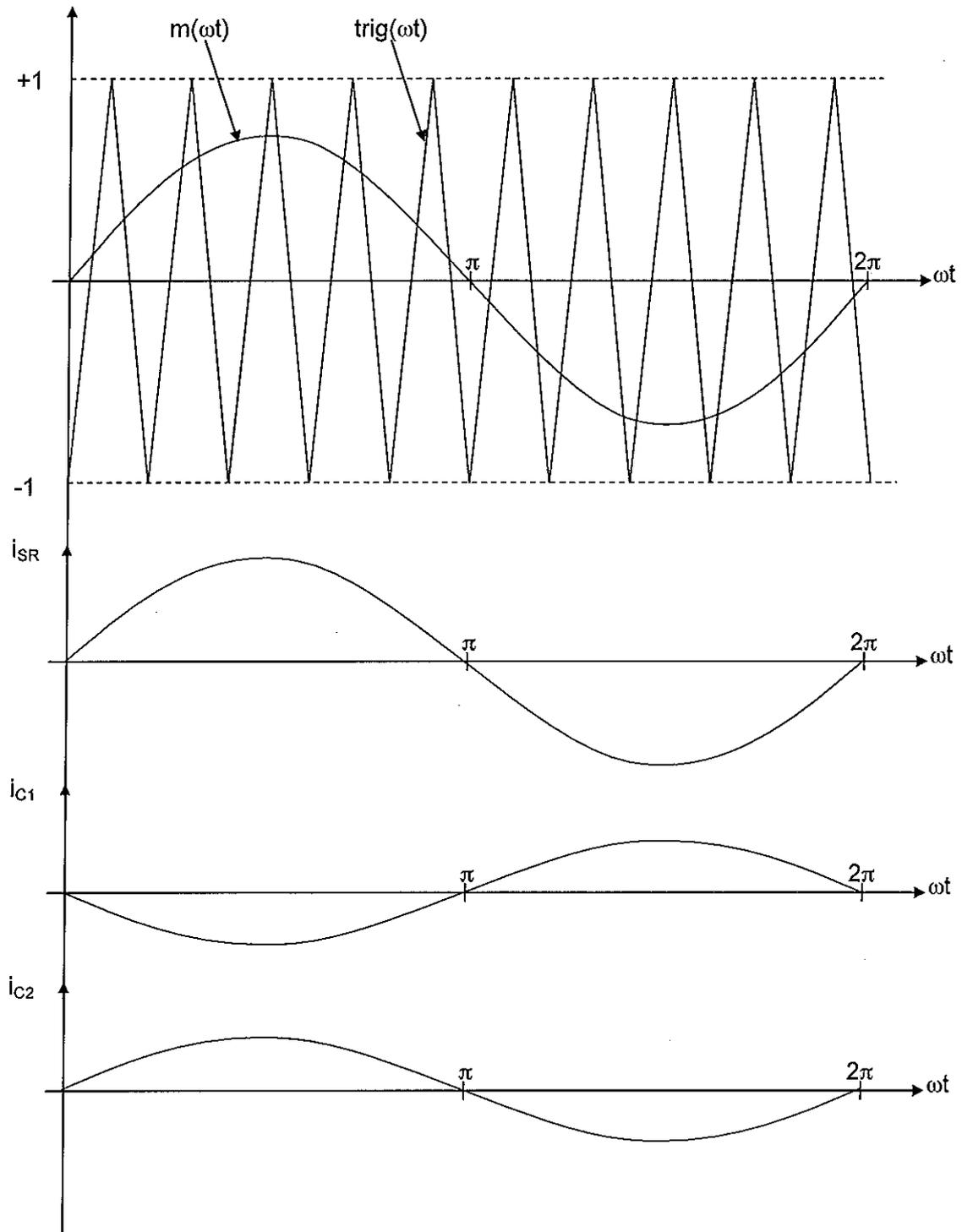
Q33 : Pertes par commutation

Q34 : Pertes totales

Interrupteur	Tension crête	Courant moyen	Courant efficace	Pertes par conduction	Pertes par commutation
IGBT T <sub>A</sub> , T <sub>B</sub>	800V	8A	14,1A	14,15W	65W
Diodes D <sub>A</sub> , D <sub>B</sub>	800V	1,77A	6,1A	3,26W	
Pertes totales onduleur	165W				

DR8 Onduleur MLI

Q25 : Courants dans  $C_1$  et  $C_2$ .



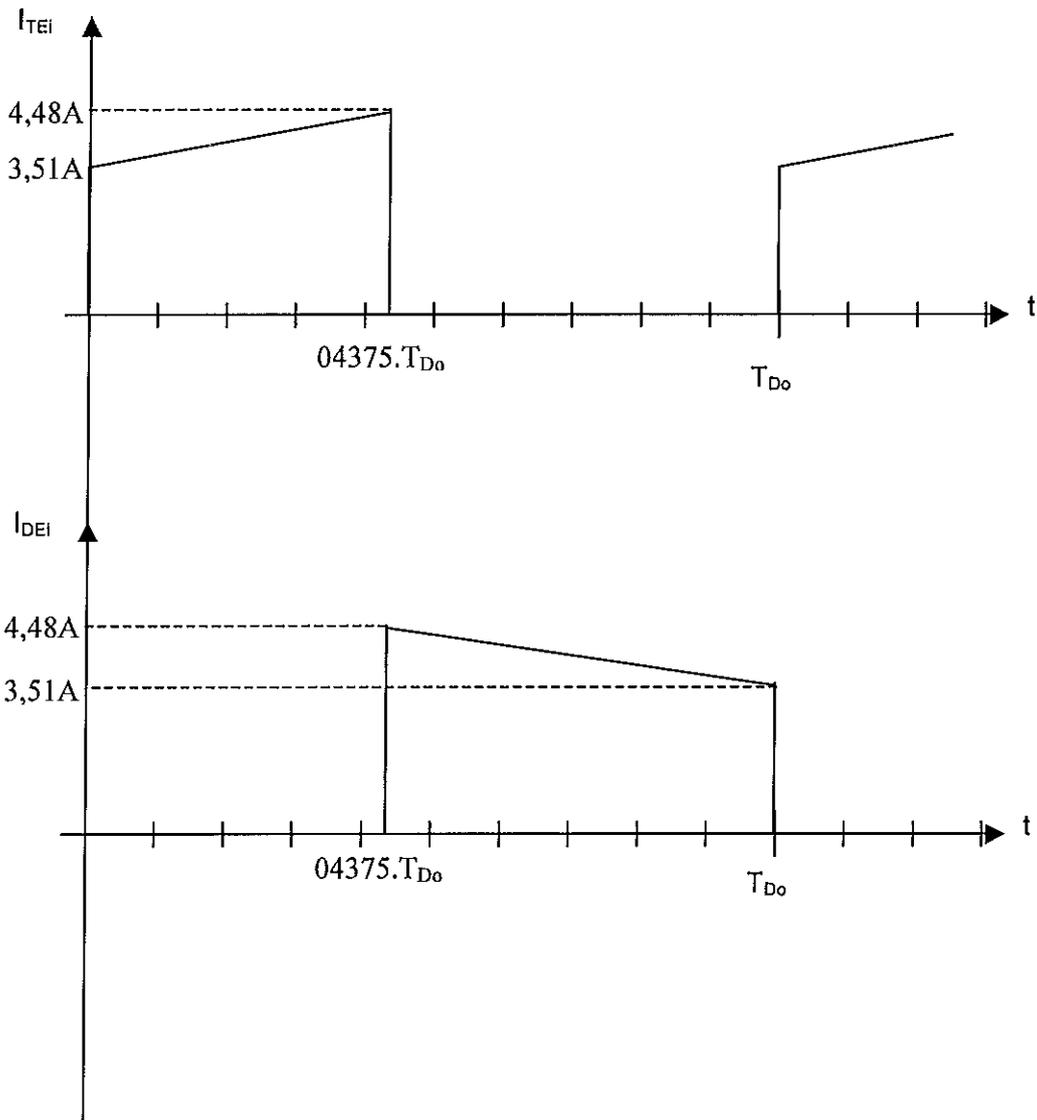
DR9 Etage MPPT

Q36 : Rapport cyclique ondulation et formes d'ondes dans l'étage MPPT i :

$\langle i_{MPPI} \rangle = \dots 4A \dots$

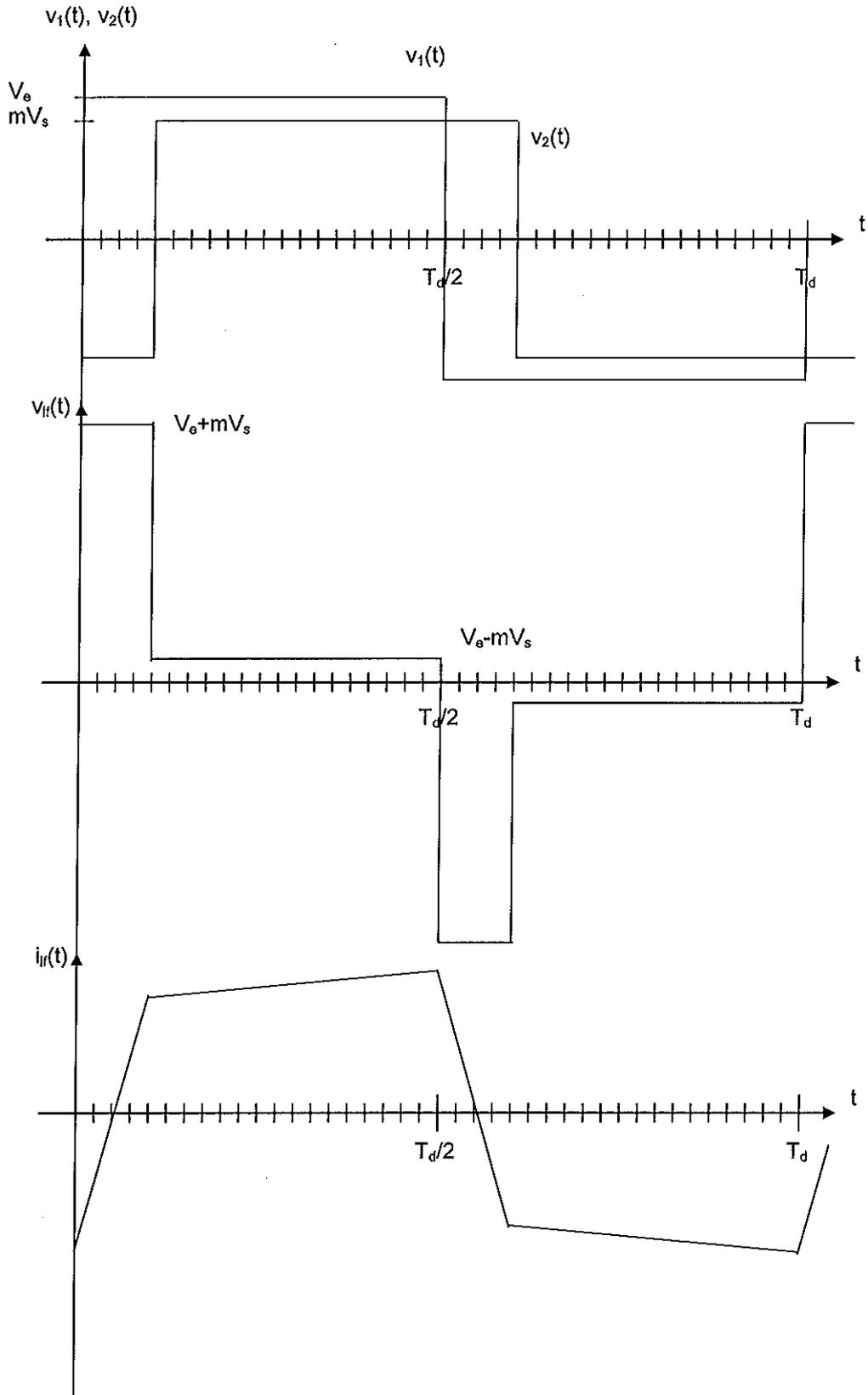
$\alpha_{MPPI} = \dots 0,4375 \dots$

$\Delta i_{MPPI} = \dots 0,98A \dots$



DR10 Structure DAB

Q51 : Formes d'ondes dans le transformateur de la structure DAB



DR11 Structure DAB

Q55 : Courants d'entrée  $i_e(t)$  et de sortie  $i_s(t)$  du convertisseur DAB

