

**MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE, DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE**

Direction générale des ressources humaines

AGRÉGATION INTERNE de GÉNIE ÉLECTRIQUE

Rapport du jury de la Session 2006

*Présenté par Claude BERGMANN,
Inspecteur général de l'éducation nationale, Président du Jury*

Les rapports des jurys des concours sont établis sous la responsabilité des présidents de jury

MODALITÉS DU CONCOURS DE L'AGRÉGATION INTERNE

ANNEXE A L'ARRETE DU 12 SEPTEMBRE 1988 FIXANT LES MODALITÉS DES CONCOURS

DE L'AGRÉGATION

EPREUVES DU CONCOURS INTERNE DE L'AGREGATION

Section Génie électrique

A. - Épreuves écrites d'admissibilité

1° **Première épreuve** : Durée maximale : **8 heures**. Coefficient : 1.

L'épreuve, qui prend appui sur un système industriel défini par une documentation technique s'organise en deux parties :

- La première permet d'évaluer les capacités du candidat à utiliser ses connaissances scientifiques et techniques pour expliciter ou valider les solutions retenues ;
- La seconde permet d'évaluer les capacités du candidat à utiliser le support proposé pour élaborer un exercice permettant l'évaluation des connaissances et méthodes acquises par les élèves.

Le candidat doit situer l'exercice dans un processus d'apprentissage et par rapport aux autres enseignements scientifiques ou techniques qui lui sont associés.

2° **Deuxième épreuve** : Durée maximale : **6 heures**. Coefficient : 1.

L'épreuve porte sur l'étude d'un problème d'automatisation. Elle permet d'évaluer les capacités du candidat :

- A mobiliser, ses connaissances en automatique et en informatique industrielle pour analyser et résoudre un problème d'automatisation ;
- A proposer, pour certains points clés mis en évidence lors de l'étude, la ressource méthodologique et les techniques pédagogiques nécessaires à l'enseignement à un niveau de formation déterminé.

B. - Epreuves orales d'admission

1° **Première épreuve** : Durée : **1 heure**. Coefficient 1.

L'épreuve consiste en la présentation et la soutenance par le candidat d'un dossier original relatif à un projet qu'il a conduit dans le cadre de la discipline dans laquelle il enseigne.

Le thème du projet est pris dans les programmes des enseignements technologiques de la spécialité donnés dans les classes terminales de lycée ou dans les classes post-baccalauréat.

Le projet doit mettre en valeur :

- d'une part la dimension technologique du thème dans ses composantes scientifiques, techniques et aussi économiques, sociales et humaines ;
- d'autre part les aspects pédagogiques en relation avec le niveau d'enseignement retenu.

Le candidat dispose de trente minutes pour présenter :

- les raisons qui l'ont conduit au choix du thème ;
- les réalisations (documents, matériels, logiciels...) relatives aux aspects techniques et pédagogiques du projet ;
- les objectifs pédagogiques retenus, leur opérationnalisation, notamment les modes et critères d'évaluation retenus ;
- les documents d'enseignement établis ;

Le jury, au cours de l'entretien de trente minutes qui suit l'exposé, peut :

- faire approfondir certains points du projet ;
- demander des précisions sur les solutions techniques adoptées ;
- faire expliciter certains aspects de la démarche pédagogique.

Le jury apprécie :

- la valeur industrielle, technique et économique du thème retenu ;
- la qualité du travail effectué ;
- les connaissances scientifiques et techniques du candidat ;
- la maîtrise de la didactique de la discipline, des méthodes et moyens d'enseignement ;
- la connaissance de l'environnement du système technique support du thème ;
- les qualités d'expression et de communication du candidat.

2° **Deuxième épreuve** : Durée maximale : **8 heures**. Coefficient 1.

Cette épreuve consiste à exploiter des documents techniques et pédagogiques relatifs à une séquence de « travaux pratiques » ou à une séquence à caractère expérimental, élément d'un processus d'apprentissage.

Elle permet d'évaluer les capacités du candidat à :

- proposer et justifier les principes, méthodes et modes opératoires à mettre en œuvre et à dégager les concepts auxquels ils se rattachent ;
- réaliser, pour tout ou partie, selon la durée impartie, l'activité prévue.

AGRÉGATION INTERNE DE GÉNIE ÉLECTRIQUE

COMPOSITION DU JURY – SESSION 2006

- ◆ **M. BERGMANN Claude** Inspecteur général de l'éducation nationale, Président,
- ◆ **M. CAËROU Jean-Claude** Maître de conférences, Grenoble, vice-président,
- ◆ **M. LEFORT Patrick** Inspecteur d'Académie, Inspecteur Pédagogique Régional, Aix-Marseille, vice-président,

- ◆ **M. BELLEC Dominique** Professeur agrégé, Poitiers
- ◆ **M. BONNET André** Professeur agrégé, Aix-Marseille,
- ◆ **M. BOURON Pascal** Professeur agrégé, Lyon
- ◆ **MM. BUSSAC Gylène** Professeur agrégé, Toulouse,
- ◆ **M. CORNUT Pascal** Professeur agrégé, Lille
- ◆ **M. DESCHAMPS DE PAILLETTE Thierry** Professeur agrégé, Orléans-Tours
- ◆ **M. DESILLIERE Michel** Professeur agrégé, Rennes,
- ◆ **M. ETIEN Erick** Maître de conférence, Poitiers,
- ◆ **MM. FOUCHER Agnès** Professeur agrégé, Toulouse
- ◆ **MM. FRENEA-ROBIN Marie** Maître de conférence, Lyon
- ◆ **M. GARNIER Claude** Professeur agrégé, Avignon
- ◆ **M. GARNIER Eric** Professeur agrégé, Brive
- ◆ **M. GUILLOSSOU Bernard** Professeur agrégé, Créteil
- ◆ **M. KEUNEBROEK Laurent** Professeur agrégé, Nantes,
- ◆ **M. LEFBVRE Stéphane** Maître de conférences, Paris
- ◆ **M. OLIVIER Jean** Professeur agrégé, La Réunion,
- ◆ **M. PLEUVERAUX François** Professeur agrégé, Aix-Marseille,
- ◆ **M. RAMASOANA Raymond** Professeur agrégé, Lyon,
- ◆ **M. ROYANNAIS Bernard** Inspecteur d'Académie, Inspecteur Pédagogique Régional, Toulouse,

- ◆ **M. SAINT-PIERRE Jean** Professeur agrégé, Nantes,
- ◆ **M. SITTLER Jean** Professeur agrégé, Strasbourg
- ◆ **M. THAUVIN Jean-Pierre** Professeur agrégé, Paris,
- ◆ **M. TSCHIRHART Daniel** Professeur agrégé, Poitiers,
- ◆ **M. VOSSOT Sylvain** Professeur agrégé, Strasbourg,

AGRÉGATION INTERNE DE GÉNIE ÉLECTRIQUE

SESSION 2006

DONNÉES QUANTITATIVES

CONCOURS INTERNE

Nombre de postes :	12
Nombre de candidats inscrits :	
Dans l'option A :	198
Dans l'option B :	262
Nombre de candidats présents aux deux épreuves d'admissibilité :	
Dans l'option A :	122
Dans l'option B :	154
Nombre de candidats admissibles :	
Dans l'option A :	16
Dans l'option B :	14
Nombre de candidats admissibles présents :	
Dans l'option A :	16
Dans l'option B :	12
Nombre de candidats admis :	
Dans l'option A :	5
Dans l'option B :	7
Moyenne du premier admissible :	
Dans l'option A :	11,54
Dans l'option B :	10,99
Moyenne du dernier admissible :	
Dans l'option A :	8,75
Dans l'option B :	8,63
Moyenne du premier admis :	
Dans l'option A :	12,92
Dans l'option B :	12,70
Moyenne du dernier admis :	
Dans l'option A :	11,57
Dans l'option B :	10,07

AGRÉGATION INTERNE DE GÉNIE ÉLECTRIQUE

SESSION 2006

DONNÉES QUANTITATIVES

CONCOURS D'ACCÈS A L'ECHELLE DE RÉMUNERATION DES PROFESSEURS AGRÉGÉS

Nombre de postes :	4
Nombre de candidats inscrits :	
Dans l'option A :	38
Dans l'option B :	39
Nombre de candidats présents aux deux épreuves d'admissibilité :	
Dans l'option A :	
Dans l'option B :	
Nombre de candidats admissibles :	
Dans l'option A :	0
Dans l'option B :	1
Nombre de candidats admissibles présents :	
Dans l'option A :	0
Dans l'option B :	1
Nombre de candidats admis :	
Dans l'option A :	0
Dans l'option B :	1
Moyenne du premier admissible :	
Dans l'option A :	---
Dans l'option B :	10,62
Moyenne du dernier admissible :	
Dans l'option A :	---
Dans l'option B :	---
Moyenne du premier admis :	
Dans l'option A :	---
Dans l'option B :	11,31

AGRÉGATION INTERNE DE GÉNIE ÉLECTRIQUE

SESSION 2006

ANALYSE DES RÉSULTATS (C.I.)

Épreuves d'admissibilité	Note la plus basse	Note Moyenne	Note la plus haute
Première épreuve (coefficient 1) 8 H			
Option A	00,00	4,42	09,98
Option B	00,00	3,70	09,26
Deuxième épreuve (coefficient 1) 6 H			
Option A	00,00	5,83	14,28
Option B	00,00	4,91	14,45
Épreuves d'admission			
Première épreuve (coefficient 1)			
Option A	13,00	16,60	19,00
Option B	06,00	10,86	15,00
Deuxième épreuve (coefficient 1)			
Option A	10,00	12,60	15,00
Option B	12,00	14,86	18,00

ANALYSE DES RÉSULTATS (A.E.R.P.A.)

Épreuves d'admissibilité	Note la plus basse	Note Moyenne	Note la plus haute
Première épreuve (coefficient 1) 8 H			
Option A	0,10	04,00	07,58
Option B	00,00	04,27	08,65
Deuxième épreuve (coefficient 1) 6 H			
Option A	01,34	05,54	10,08
Option B	00,17	04,38	12,60
Épreuves d'admission			
Première épreuve (coefficient 1)			
Option A	---	---	--
Option B	---	---	10,00
Deuxième épreuve (coefficient 1)			
Option A	---	---	---
Option B	---	---	14,00

AGRÉGATION

SESSION 2006

CONCOURS INTERNE

Section : GÉNIE ÉLECTRIQUE

Option A : ÉLECTRONIQUE ET INFORMATIQUE INDUSTRIELLE

ÉTUDE D'UN SYSTÈME INDUSTRIEL

DURÉE : 8 HEURES, COEFFICIENT : 1

Aucun document n'est autorisé.

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

ROBOT MOBILE D'INTERVENTION ET DE SÉCURITÉ

Ce sujet comporte 4 dossiers distincts :

📁 Dossier de présentation	16 pages
📁 Texte du sujet avec le travail demandé	19 pages
📁 Documents réponses DR1 à DR7	3 pages
📁 Documents annexes	19 pages
📁 Schémas structurels au format A3	2 pages

Ce sujet comporte trois parties indépendantes :

Partie **A** : Modélisation et analyse du fonctionnement.

Partie **B** : Analyse de la transmission des données.

Partie **C** : Analyse et implémentation de l'action locomotion.

Une lecture préalable et complète du sujet est indispensable.

Il sera tenu compte de la cohérence avec laquelle les candidats traiteront chaque partie, le jury préférant une réflexion d'ensemble de la partie abordée à un éparpillement des réponses.

! Les questionnements portant sur les développements pédagogiques se verront affectés de 60 % des points de l'épreuve. Il est donc conseillé d'y consacrer 60 % du temps de l'épreuve.

Les candidats sont invités à numéroter chaque page de leur copie et à indiquer clairement le numéro de la question traitée.

Les candidats sont priés de rédiger les différentes parties du problème sur feuilles séparées et clairement repérées. Chaque question est identifiée par une police italique et repérées par un numéro.

Il leur est rappelé qu'ils doivent utiliser les notations propres au sujet, présenter clairement les calculs et dégager ou encadrer tous les résultats.

Tout résultat incorrectement exprimé ne sera pas pris en compte. En outre les correcteurs leur sauront gré d'écrire lisiblement et de soigner la qualité de leur copie.

Il sera tenu compte de la qualité de rédaction, en particulier pour les réponses aux questions ne nécessitant pas de calcul. Le correcteur attend des phrases complètes respectant la syntaxe de la langue française.

Pour la présentation des applications numériques, il est rappelé que lors du passage d'une forme littérale à son application numérique, il est recommandé aux candidats de procéder comme suit :

- après avoir rappelé la relation littérale, chaque grandeur est remplacée par sa valeur numérique en respectant la position qu'elle avait dans la relation puis le résultat numérique est donné sans calculs intermédiaires et sans omettre son unité.

Si le texte du sujet, de ses questions ou de ses annexes, vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, il vous est demandé de la (ou les) mentionner explicitement dans votre copie.

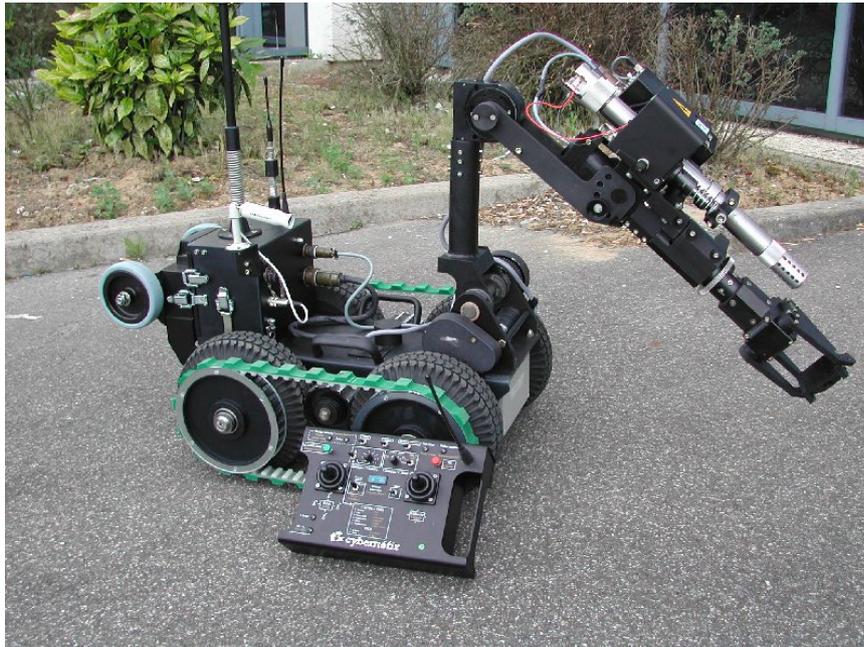
A.1 : PrÉsEntation du systÈme

A. PrÉsEntation gÉnÉrale

L'unitÉ mobile de tÉlÉ opÉration que nous nous proposons d'Étudier ici est dÉveloppÉe et commercialisÉe par la sociÉtÉ CYBERNETIX (robot d'intervention tÉlÉ opÉrÉ CASTOR), spÉcialisÉe dans les domaines de la robotique mobile, civile et militaire.

Ce robot est conÇu pour effectuer toutes sortes d'opÉrations d'inspection et de surveillance en milieu hostile et dangereux pour l'homme : milieux chimique ou nuclÉaire, champs de mines, lieux publics soumis à des risques d'attentats, etc.

Son faible encombrement et sa lÉgÈretÉ le rendent particuliÈrement intÉressant pour des missions urgentes et des approches rapides d'objets suspects.



Le robot peut-Ètre ÉquipÉ de diffÉrentes fonctionnalitÉs dont la modularitÉ permet d'optimiser l'efficacitÉ du systÈme au regard de la nature de la mission à effectuer (modules missions).

L'Étude portera sur l'architecture gÉnÉrale du robot et sur certaines fonctions, tant du point de vue matÉriel que logiciel, l'approche se voudra donc pluridisciplinaire (Électronique, informatique industrielle, automatique).

B. PrÉsEntation du matÉriel

Le systÈme est composÉ de deux unitÉs distinctes :

Une valise incluant un pupitre permettant de piloter l'ensemble des actionneurs du Robot, de visualiser les états du systÈme ainsi que les images acquises par les camÉras vidÉo.



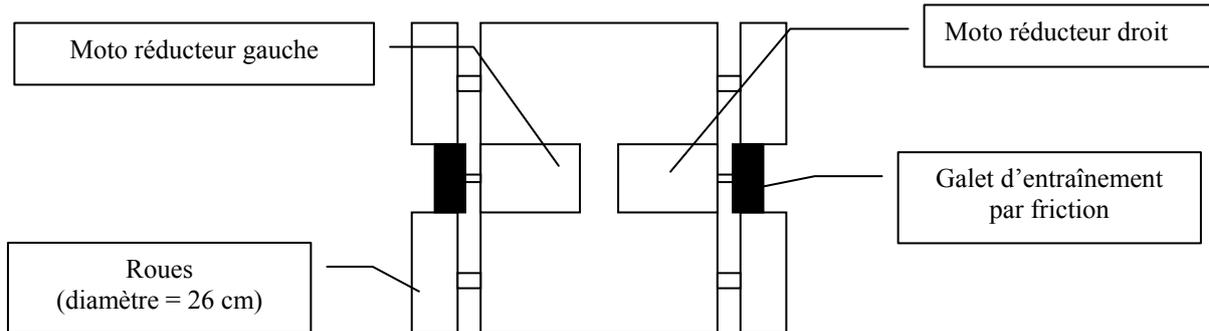
Une unitÉ mobile ÉquipÉe de modules pour des missions adÉquats



L'unitÉ mobile (robot) communique avec l'unitÉ de tÉlÉcommande (valise) par voie hertzienne, et dispose donc d'un Émetteur vidÉo, avec un sÉlecteur de canal pour la transmission des images camÉras et d'une liaison MODEM radiofrÉquence half duplex pour la transmission des donnÉes numÉriques.

L'unité mobile (robot) est constituée de :

- Un bras articulé permettant de supporter les différents modules missions :
 - ✓ Un canon pour la neutralisation des objets piégés,
 - ✓ Une pince articulée pour la manipulation d'objets,
 - ✓ Un projecteur,
 - ✓ Un télémètre ultrasonore avec un pointeur laser pour la visée,
 - ✓ Une caméra,
 - ✓ Etc.
- Un système de caméra qui permet d'accueillir jusqu'à 4 caméras dont une montée sur tourelle motorisée.
- Un châssis mobile monté sur chenilles ou sur roues, propulsé par 2 moto réducteurs mus par des moteurs à courant continu, positionnés de chaque côté du robot.
Chaque roue est entraînée par friction d'un galet solidaire de l'axe du moto réducteur.



Ainsi, le sens de déplacement du Robot et sa direction ne dépendent que de la vitesse respective de chacun des moteurs. Une différence entre les vitesses de rotation de chaque moteur entraîne un virage de l'unité mobile.

La valise de commande contient :

- Un rack portable incluant toutes les commandes du robot,
- Un écran de contrôle à affichage LCD.

Notes sur les systèmes de transmission de données :

Il existe deux versions du système de communication des données par voies radiofréquences (MODEM), l'une exploitant les fréquences militaires et l'autre utilisant les bandes civiles. Pour des raisons de confidentialité, nous n'étudierons que la version exploitant la bande des **433 MHz**.

Dans tous les cas de figure, la transmission des données numériques par voie hertzienne s'effectue en utilisant le mode **NRZ-FSK**.

C. *DÉlimitation de la PrÉsentation*

Pour aborder un tel système il est important de délimiter les domaines que nous allons traiter dans cette étude.

Nous allons dans un premier temps limiter notre analyse au logiciel qui est embarqué dans l'unité robot.

Le rôle dévolu à cet élément est de dialoguer d'une part avec la valise et d'autre part avec chacune des unités spécialisées de commande des organes du robot.

Dans un second temps sera esquissée l'étude du logiciel embarqué dans la valise.

Pour terminer, nous vous proposons de vous intéresser plus en détail aux unités spécialisées.

Pour les besoins du sujet, la modélisation n'est que partielle.

B.1 : ModÉlisation

Nous proposons deux modélisations, l'une basée sur le modèle UML, l'autre s'appuyant sur une approche fonctionnelle.

Le modèle UML permet de décrire le comportement du robot vis-à-vis de son unité de commande et de l'utilisateur. Cette approche volontairement orientée logiciel est supportée par une architecture matérielle modulaire et extensible. Cette modularité est rendue possible grâce à l'utilisation d'un bus de terrain mono maître interne qui autorise l'ajout de modules repérés par une adresse unique.

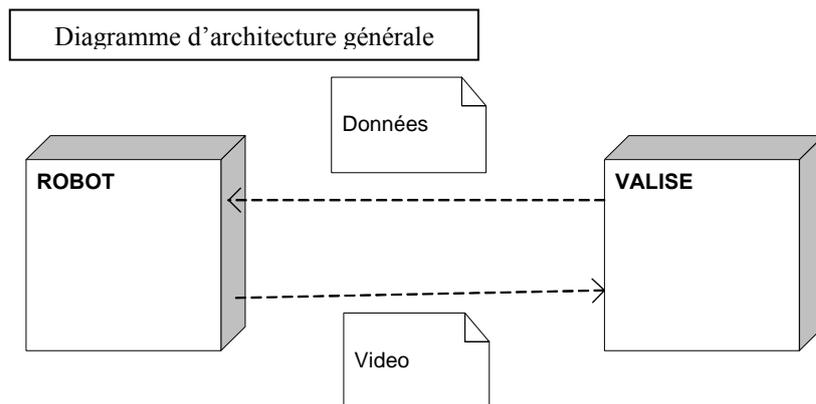
L'approche fonctionnelle a été réduite aux schémas de niveau 1 pour un robot et une valise de commande dans une configuration « standard ». Seuls les schémas électriques des modules étudiés (module de pilotage moteur et module de gestion des échanges côté robot) sont fournis.

A. modèle uml

L'objectif de la démarche consiste à étudier les architectures logicielles respectives des deux principaux composants que sont le robot et la valise. Ces deux composants communiquent par deux liaisons hertziennes, la première étant dédiée à la vidéo (4 canaux simultanés, simplex) et la seconde aux données (télécommandes (TC) et télémessures (TM), half-duplex). Nous passerons sous silence la liaison filaire développée par le fabricant.

Nota: Le circuit vidéo étant fonctionnellement indépendant et ne nécessitant - hormis la commutation de circuit - aucune ressource logicielle sur les systèmes robot et valise, il sera mentionné mais ne sera pas étudié dans la suite du sujet.

Afin d'offrir un niveau de sécurité suffisant dans la transmission des données par voie hertziennes, celles-ci sont encapsulées dans des trames de réseau de terrain "Modbus". Le maître est embarqué dans la valise et l'esclave dans le robot.



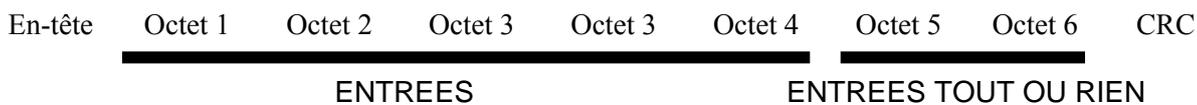
2.1.1 Description des données échangées entre la valise et le robot :

La valise émet une trame (TC) d'écriture des données vers le robot toutes les 100 ms et ce dernier l'acquitte. Conformément aux spécifications Modbus, la valise interroge le robot qui émet en réponse une trame d'état (TM). Nous allons détailler dans cette partie les trames qui sont échangées entre la valise et le robot.

a) Trame émise de la valise vers le robot (Tram-TCvr)

Cette trame est composée de 6 octets (3 mots Modbus) :

- 4 octets pour les entrées analogiques (côté valise),
- 2 octets pour les entrées TOR (côté valise),



Octet N°1 : TCvr_EANA4 (consigne avant bras) contient la valeur analogique sur 8 bits du joystick

avant bras : montée /descente

Octet N°2 : TCvr_EANA3 (consigne bras) contient la valeur analogique sur 8 bits du joystick

bras : montée/ descente

Octet N°3 : TCvr_EANA1 (consigne loco av/ar) contient la valeur analogique sur 8 bits du joystick

locomotion : sens avant/arrière

Octet N°4 : TCvr_EANA2 (consigne loco Dr/Ga) contient la valeur analogique sur 8 bits du joystick

locomotion : sens droite /gauche

Octet N°5 : TCvr_TOR 1

Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0
Freins	Bit0 P/T/Z (activ.)	Bit1 P/T/Z (sens)	Bit2 P/T/Z (select1)	Bit3 P/T/Z (select2)	Bit4 P/T/Z (select 3)	Bit0 (LSB) Sel_cam	Bit1 (MSB) Sel_cam

Bits 1 et 0 :

Ce codage est fait à partir des 4 informations binaires : PA0, PA1, PA2, PA3 (sélection caméra) valise

0 0 = caméra n°1 (avant).

1 0 = caméra n°2 (droite).

0 1 = caméra n°3 (arrière).

1 1 = caméra n°4 (gauche).

Bits 4, 3, 2 : sélection moteur

x x x = moteurs Pan / Tilt / Zoom1 / Zoom2 / pince / orientation pince.

Bits 6, 5 : activation / Sens

Bits 7

0 = Freins serrés.

1 = Freins desserrés.

Gestion des freins : l'acteur locomotion pilote automatiquement les freins si une consigne de déplacement est envoyée (sans tenir compte de ce bit de forçage).

Octet N°6 : TCvr_TOR 2

Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0
Libre	Laser	Enrouleur	Activ. RX	Projecteur	Validation Tir	TIR	Commut. Câble/RF

Bit 0 :

0 = Mode RF.

1 = Mode câble.

L'état de ce bit est la recopie de PC0 de la valise

Bit 1 :

0 = Pas de tir.

1 = Tir demandé.

L'état de ce bit est la recopie de PA7 de la valise

Bit 2 :

0 = pas de validation de tir.

1 = validation du tir.

L'état de ce bit est la recopie de PA6 de la valise

Bit 3 :

0 = arrêt projecteurs.

1 = allumage projecteurs.

L'état de ce bit est la recopie de PA4 de la valise

Bit 4 :

0 = arrêt activation RX.

1 = activation RX.

L'état de ce bit est la recopie de PC1 de la valise

Bit 5 :

0 = arrêt enrouleur.

1 = activation enrouleur.

L'état de ce bit est la recopie de PA5 de la valise

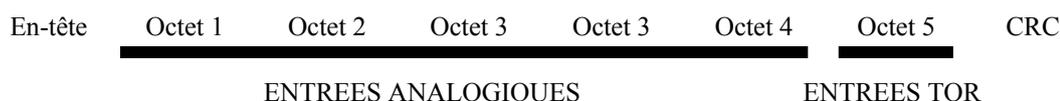
Bit 6 :

0 = arrêt laser.

1 = activation laser.

L'état de ce bit est la recopie de PC2 de la valise

b) Trame émise du robot vers la valise (Tram-TMrv)



Cette trame est composée de 5 octets :

4 octets pour les entrées analogiques (côté robot),

1 octets TOR (entrées côté robot),

Octet N°1 : TMrv_EANA (8bits LSB) EANA1 sur robot

distance du télémètre (8 bits poids faible des 12 utilisés)

Octet N°2 : TMrv_EANA (4 bits MSB) EANA1 sur robot

Bit de 0 à 3 = distance télémètre laser (4 bits poids fort des 12 utilisés)

Bit de 4 à 7 = 0

Octet N°3 : TMrv_EANA (8 bits MSB) EANA2 sur robot

Octet N°4 : TMrv_EANA (8 bits MSB) EANA3 sur robot

Octet N°5 : TMrv_TOR1 : Entrées TOR du robot

Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0
Défaut batterie robot	ETOR1	Canon prêt à tirer	0	0	0	0	0

Bit 0 à 4 :

= 0

Bit 5 :

= 0 si le bit2 de l'octet TOR2 de la trame reçu par le robot est à 0 ou à 1 pendant un temps inférieur à 3 s.

= 1 si le bit2 de l'octet TOR2 de la trame reçu par le robot est à 1 pendant un temps supérieur à 3 s.

Bit 6 :

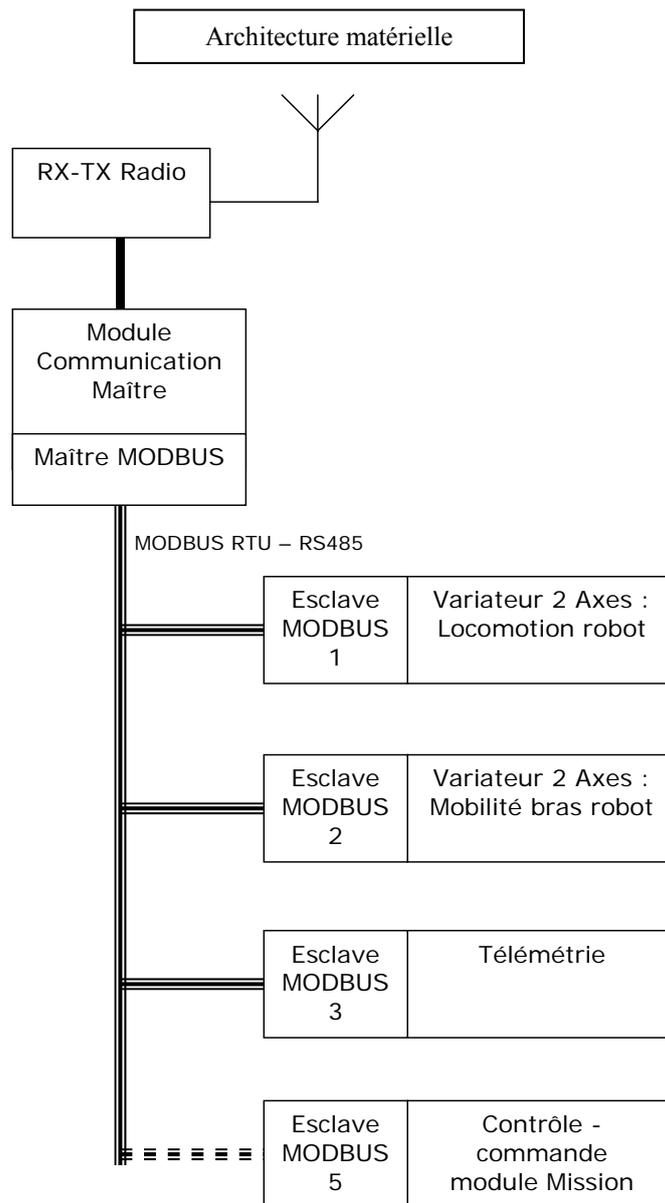
= état du bit PC0 du robot

Bit 7 :

= mise à 1 de ce bit si le seuil de l'entrée ANA0 (niveau batterie) est inférieur à 0AA9H pendant un temps supérieur à 3 s.

2.1.2 Architecture du robot

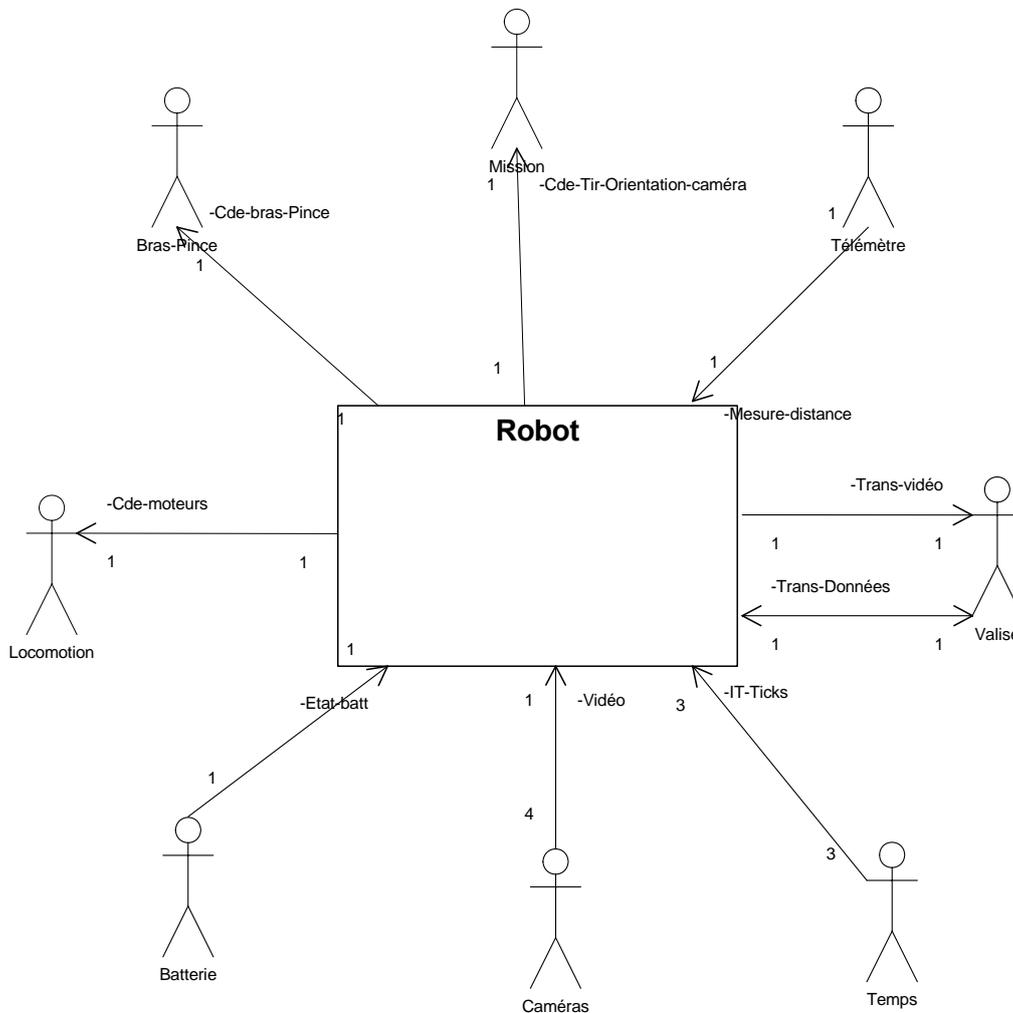
L'architecture matérielle de la partie commande du robot est composée d'une série d'unités de traitement organisées autour d'un BUS de communication MODBUS RTU.



La fiabilité du MODBUS RTU, de par son caractère déterministe, sa robustesse, son câblage très simple (3 fils) permet au module maître d'interroger ou de transmettre des ordres vers l'ensemble des modules. Pour ce faire, on utilise une table d'échange propre à chaque module. Un extrait est fourni en annexe E.

2.1.3 Modélisation de la partie supervision du robot

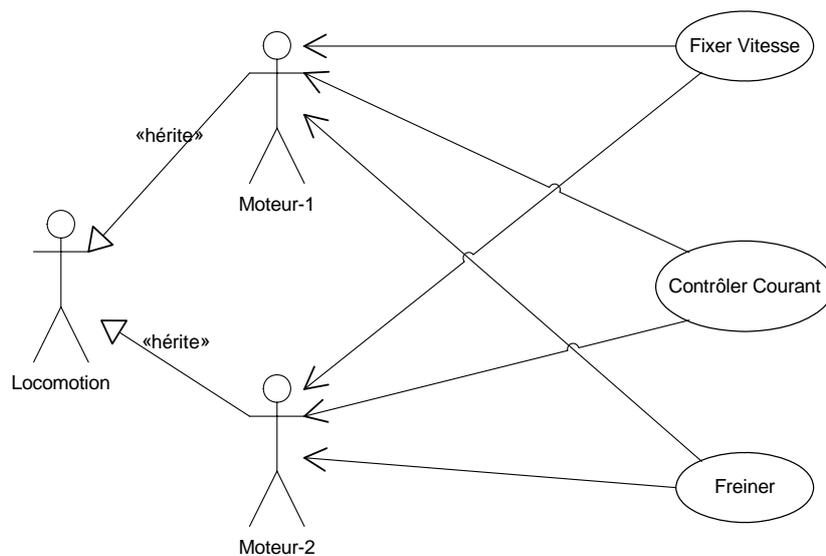
Repérons dans un premier temps les interactions entre la classe générique du système et son environnement. Chaque élément identifié de l'environnement est un acteur. Le diagramme ci-après est celui de contexte du système.



Dans le cadre du pilotage du robot nous sommes amenés, pour des raisons de lisibilité, à modéliser séparément l'interaction entre chaque acteur et le système sous forme de diagrammes de cas d'utilisation.

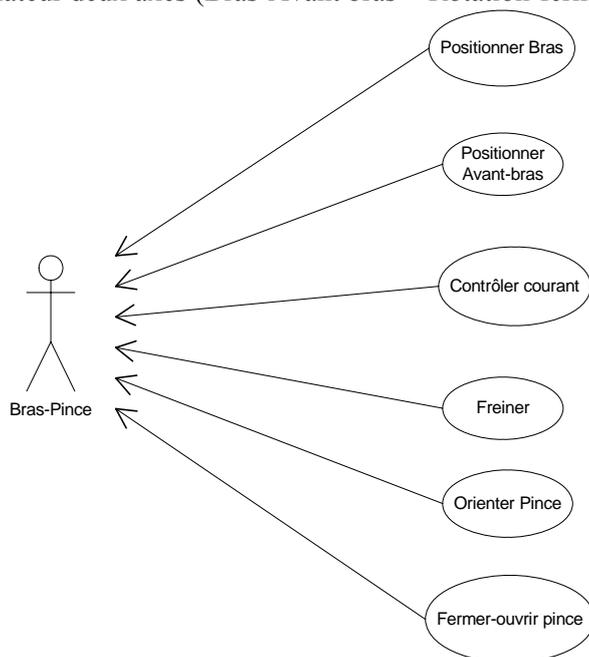
2.1.4 L'acteur locomotion

L'acteur locomotion assure le pilotage simultané de deux moteurs indépendants auxquels peut être envoyée une consigne de vitesse, elle fait intervenir une unité de traitement variateur deux axes.



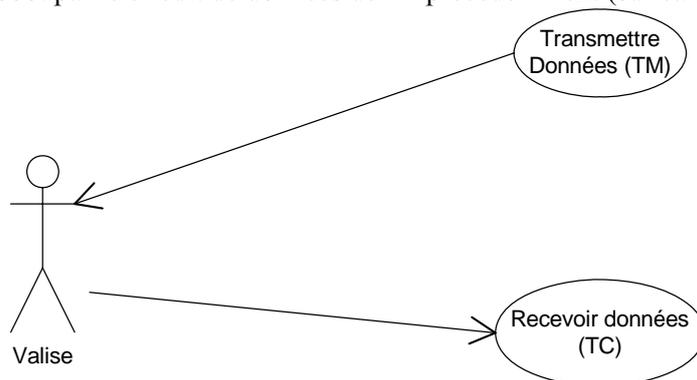
2.1.5 L'acteur bras/pince

Le bras, la pince et le tir font l'objet de pilotages indépendants, totalement contrôlés par l'opérateur, faisant intervenir deux unités de traitement variateur deux axes (Bras-Avant bras + Rotation-fermeture Pince).



2.1.6 L'acteur valise

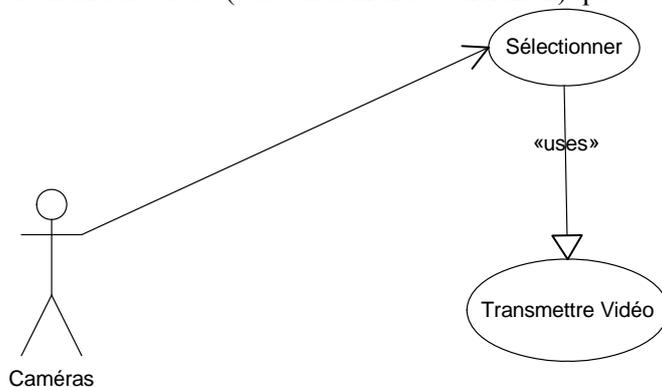
La valise interagit avec le robot par le circuit de données défini précédemment (sur canal hertzien).



2.1.7 L'acteur caméras

Une à quatre caméras peuvent être embarquées. Parmi les caméras, l'une d'entre elles peut être sélectionnée, l'une d'entre elles peut être pilotée (cf. mission).

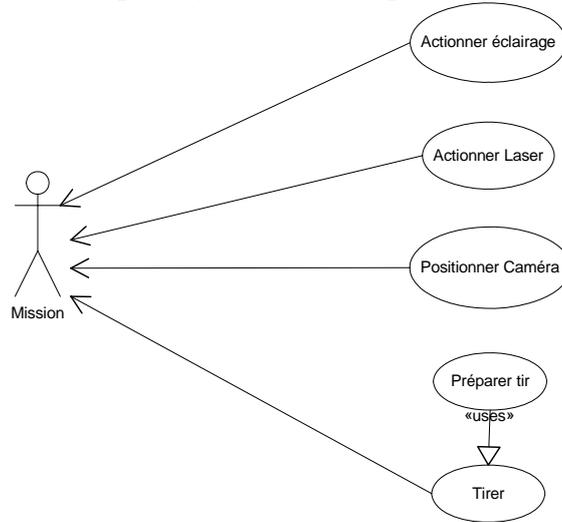
Le retour des images se fait par un circuit vidéo (sur canal filaire ou hertzien) qui est hors étude.



2.1.8 L'acteur mission

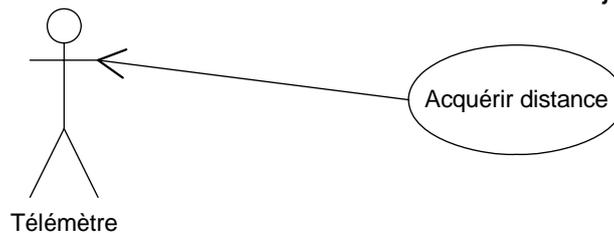
La mission a pour objet l'étude approfondie de l'objet suspect et la mise en œuvre des moyens nécessaires à sa destruction. Pour ce faire il est nécessaire de piloter la position de la caméra en azimuth et en site par une unité de traitement variateur deux axes.

De plus des systèmes d'éclairage, d'aide au pointage laser et de tir peuvent être activés.



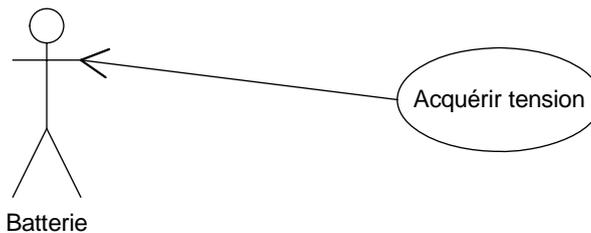
2.1.9 L'acteur télémètre

Le télémètre a pour rôle de mesurer la distance entre le robot et l'objet suspect.



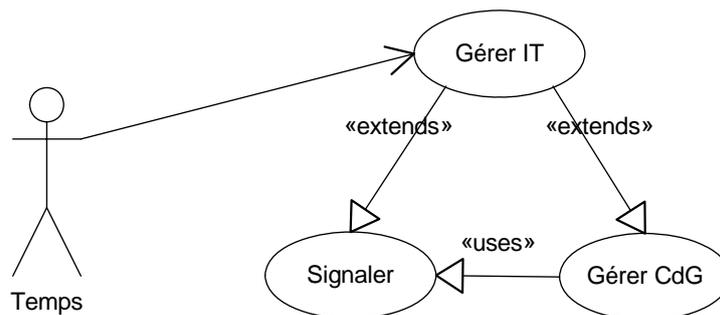
2.1.10 L'acteur batterie

La surveillance de la tension batterie est assurée en permanence et l'alarme est fournie en cas de besoin.



2.1.11 L'acteur temps

Deux bases de temps (3 s et 100 ms) sont nécessaires au fonctionnement du superviseur ainsi que la mise en œuvre de chiens de garde.



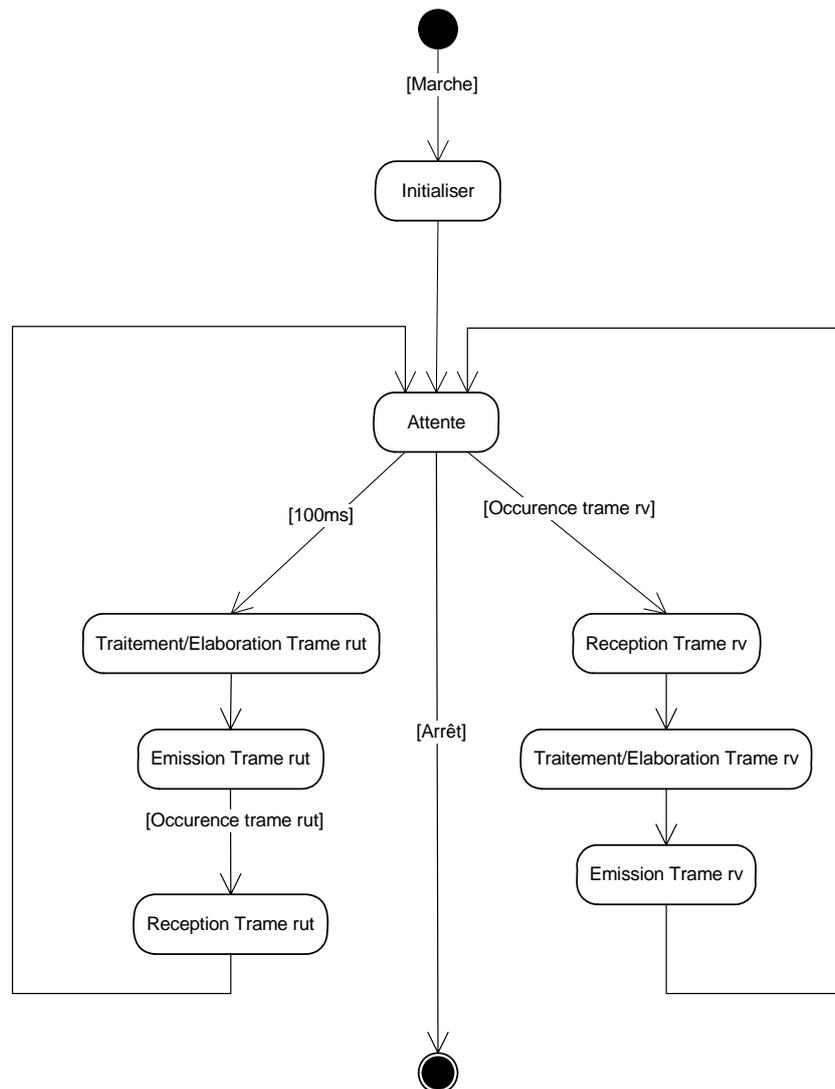
2.1.12 Diagramme d'état transition de la classe robot

Il est maintenant nécessaire de comprendre le comportement de la classe robot au cours du temps.

Pour ce faire il est indispensable de le modéliser par un diagramme "états-transitions".

Convention de notation : afin de bien différencier les communications entre la valise et le robot et entre le robot et les unités de traitement qui utilisent le même protocole, une extension "rv" sera appliquée aux éléments concernant la relation valise/robot et une extension "rut" sera appliquée aux éléments concernant la relation robot/unités de traitements.

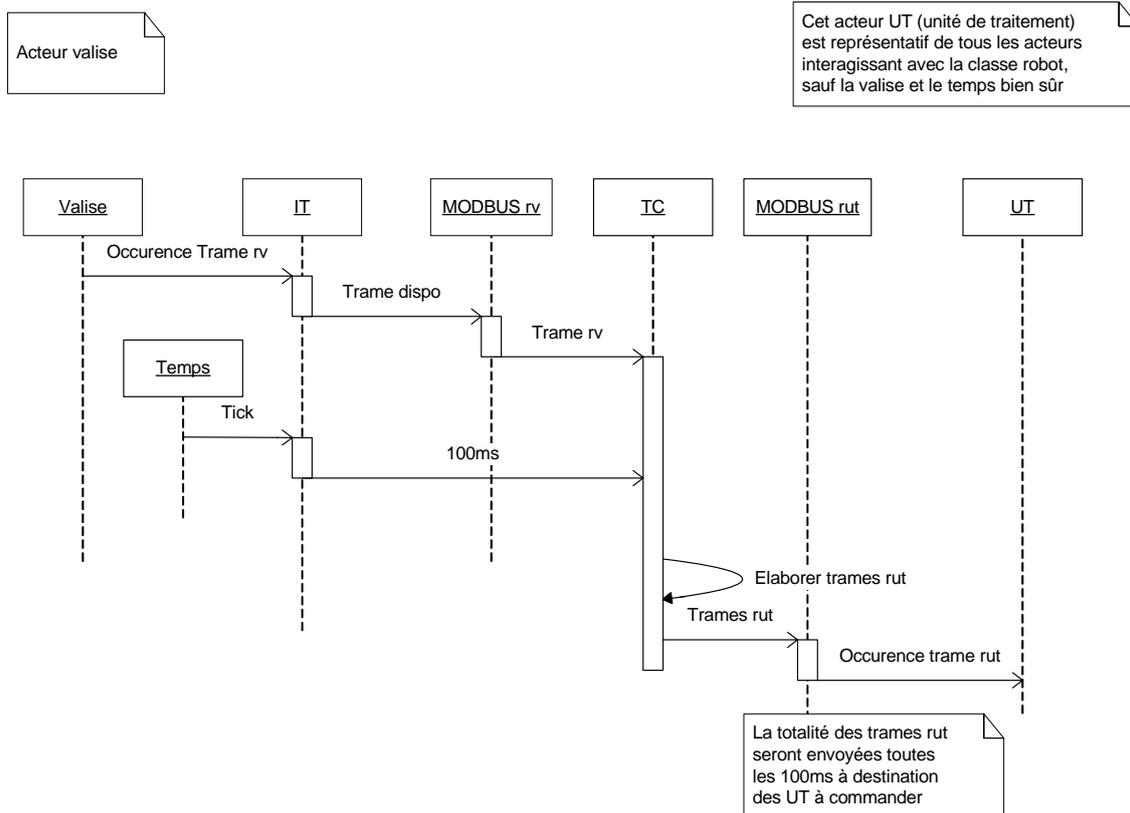
Vous noterez que "Trame rut" ou "Trame rv", conformément au protocole MODBUS, peuvent être, soit une TC, soit une TM, soit une demande de service, soit un acquittement. La différenciation n'a pas été faite à ce niveau pour des raisons de lisibilité.



Afin de bien comprendre la nature du travail attendu par chaque élément logiciel intervenant dans la réalisation d'un cas d'utilisation, il est nécessaire que chaque cas d'utilisation soit décrit par un diagramme de séquence mettant en évidence les contraintes temporelles associées.

Nous ne développerons pas la totalité des diagrammes de séquence mais nous allons décrire quelques cas d'utilisation permettant de mettre en évidence les classes qui vont participer à la réalisation de la supervision du robot.

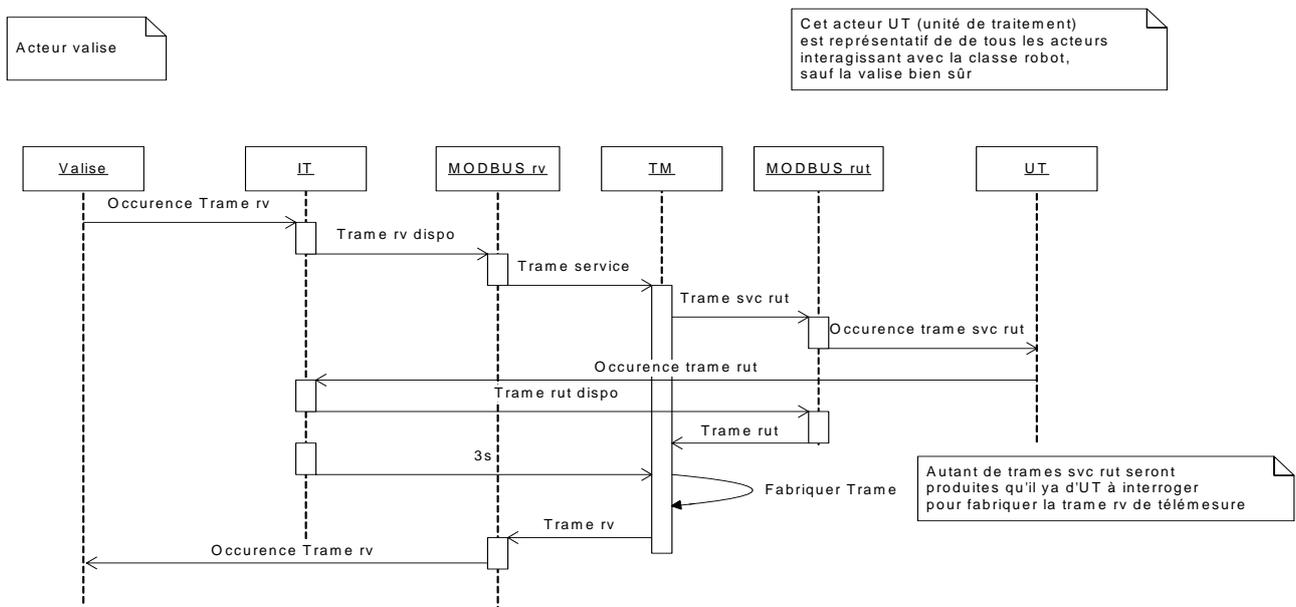
2.1.13 Diagramme de séquence du cas d'utilisation "recevoir données"



Nous constatons dans la description de ce cas d'utilisation le fait que l'objet MODBUS rv se comporte en esclave. L'acquiescement de la trame rv n'apparaît pas dans ce modèle sachant qu'il est implicite dans le cadre du protocole utilisé.

Il est à noter que l'émission de la trame rut peut à la fois être cadencée par une interruption - c'est ce qui est modélisé - mais aussi l'être par l'occurrence de la trame rv.

2.1.14 Diagramme de séquence du cas d'utilisation "transmettre données"



Dans ce cas d'utilisation nous constatons que la production d'une trame par un esclave MODBUS ne peut être réalisée que si elle est explicitement demandée par le maître au travers d'une trame de service (svc).

Chaque cas d'utilisation participe à l'élaboration d'une trame rut à partir d'une restriction spécifique à l'unité de traitement de la structure de donnée TCrv reçu de la valise dans la TramTCrv.

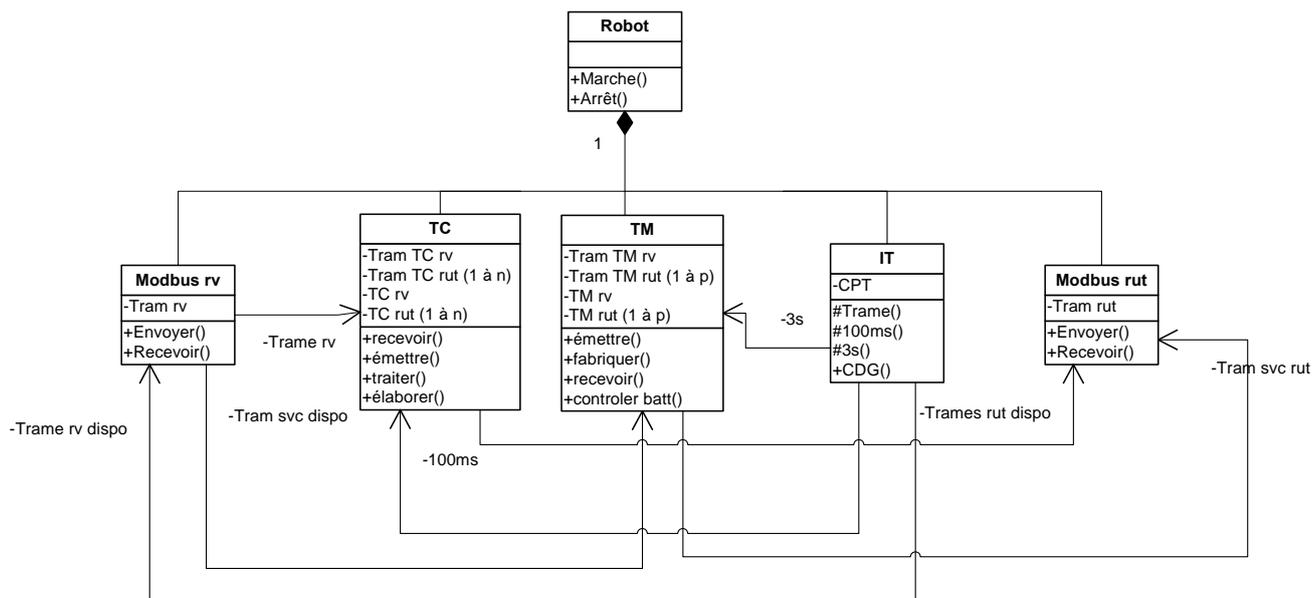
De même chaque cas d'utilisation participe à l'élaboration d'une trame Rv (TramTMrv) en la construisant à partir des informations reçues de chaque unité de traitement.

La structure principale est totalement décrite dans le chapitre 2.1.1 "Description des données échangées entre la valise et le robot". Ces structures de données sont définies comme des attributs des objets TC et TM ; les cas d'utilisation comme des compétences (méthodes) de ces deux objets.

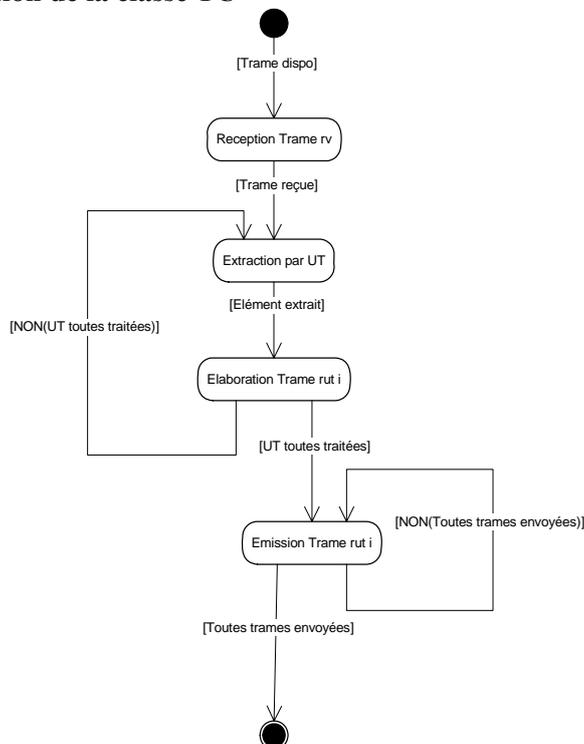
Pour ne pas surcharger les diagrammes suivants, la totalité des méthodes n'apparaîtra pas de manière explicite, ce qui n'ôtera rien à la compréhension globale de l'architecture du logiciel.

2.1.15 Diagramme des classes

Nous déduisons de notre étude les classes et les interactions entre classes nécessaires à la mise en œuvre du pilotage du robot, ainsi que la description du comportement de ces classes au cours du temps (nous limiterons ici à la classe TC).



2.1.16 Diagrammes état transition de la classe TC



2.1.17 Conception détaillée des classes Modbus

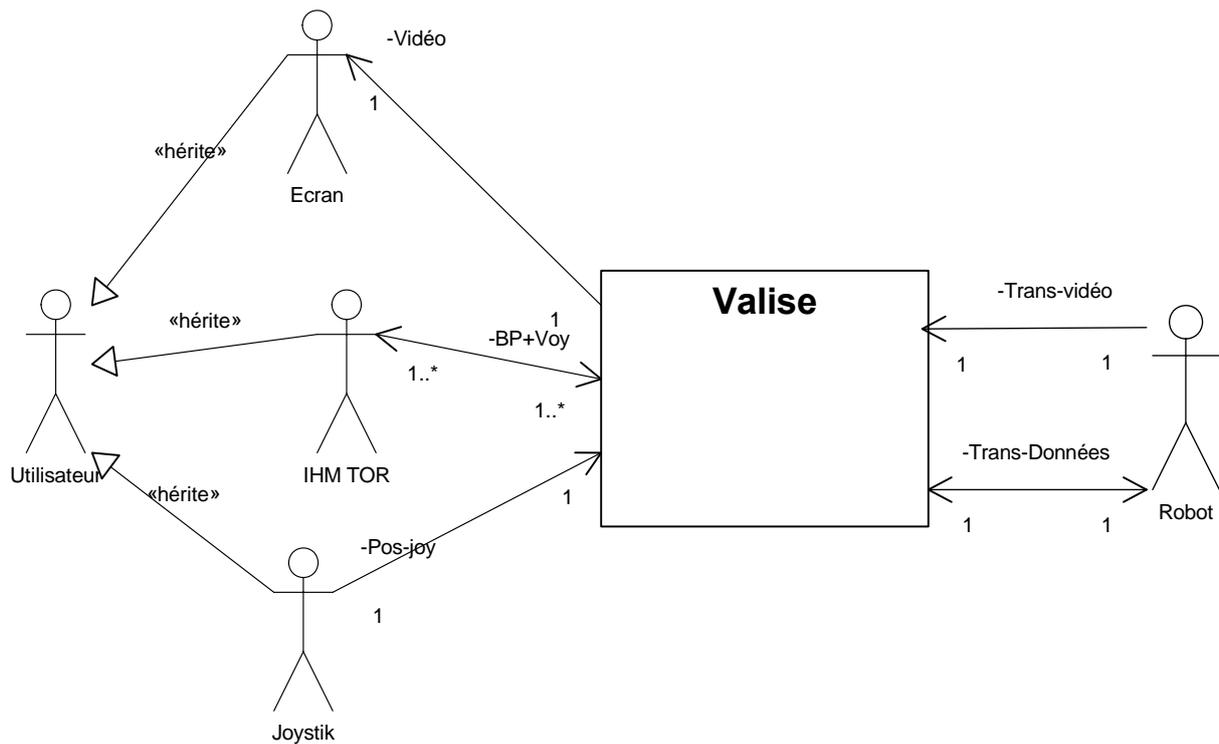
Les classes Modbus permettent d'assurer la construction de la trame (entête, corps, contrôle de trame), sa transmission sur le media, la vérification de son intégrité et son acquittement. La différence entre la classe Modbus rv et la classe Modbus rut est liée à son rôle de maître ou d'esclave et ne s'adresse pas au même média.

Nous nous intéressons aux états de chacune de ces classes ainsi qu'à l'élaboration du contrôle de CRC fourni en annexe dans la partie questionnement.

2.1.18 Modélisation de la partie commande de la valise

Ce début de modélisation vous est fourni comme base du travail pédagogique qui vous est demandé.

Vous pourrez comme pour le Robot mettre sous silence le circuit vidéo.



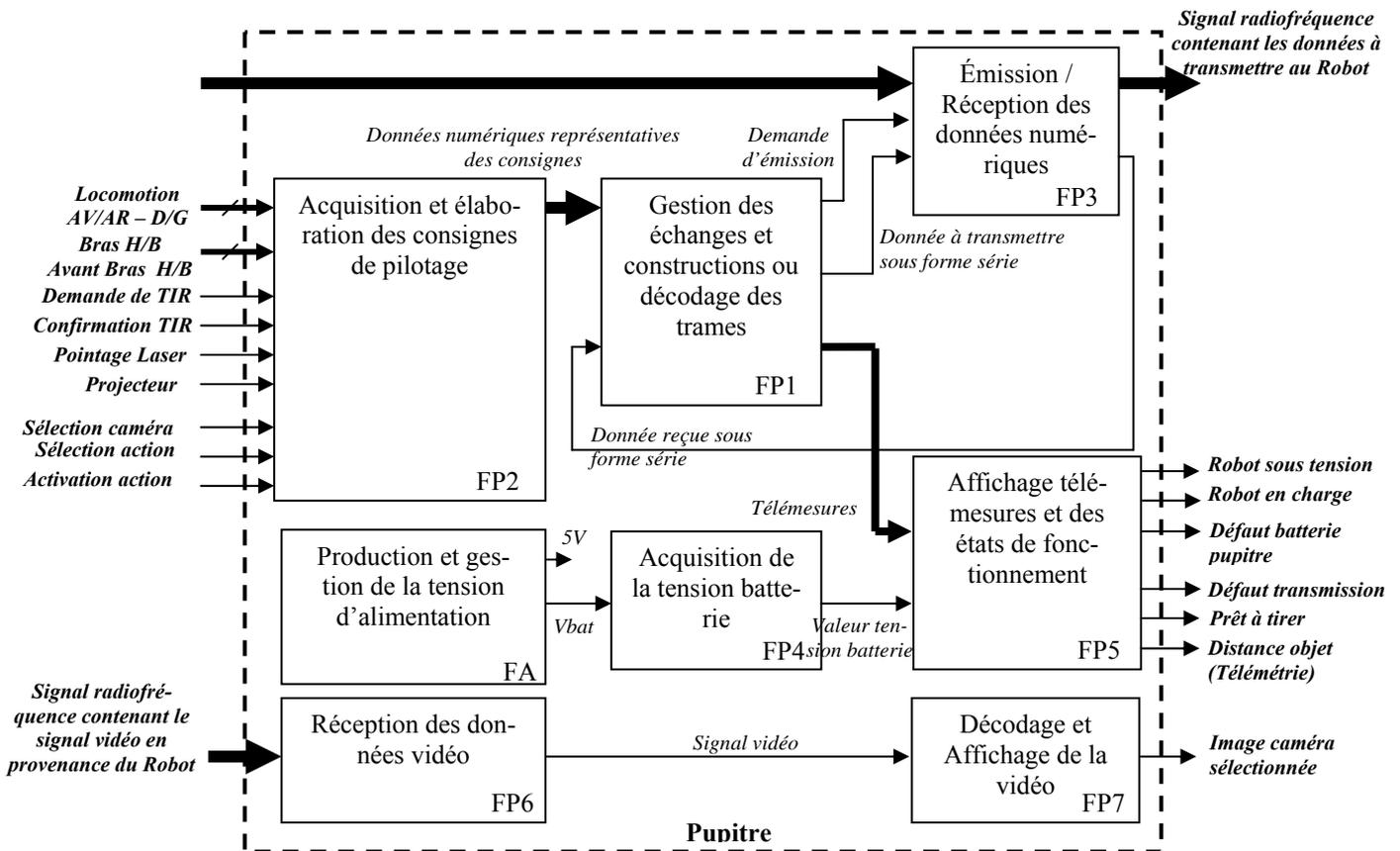
B. Approche fonctionnelle

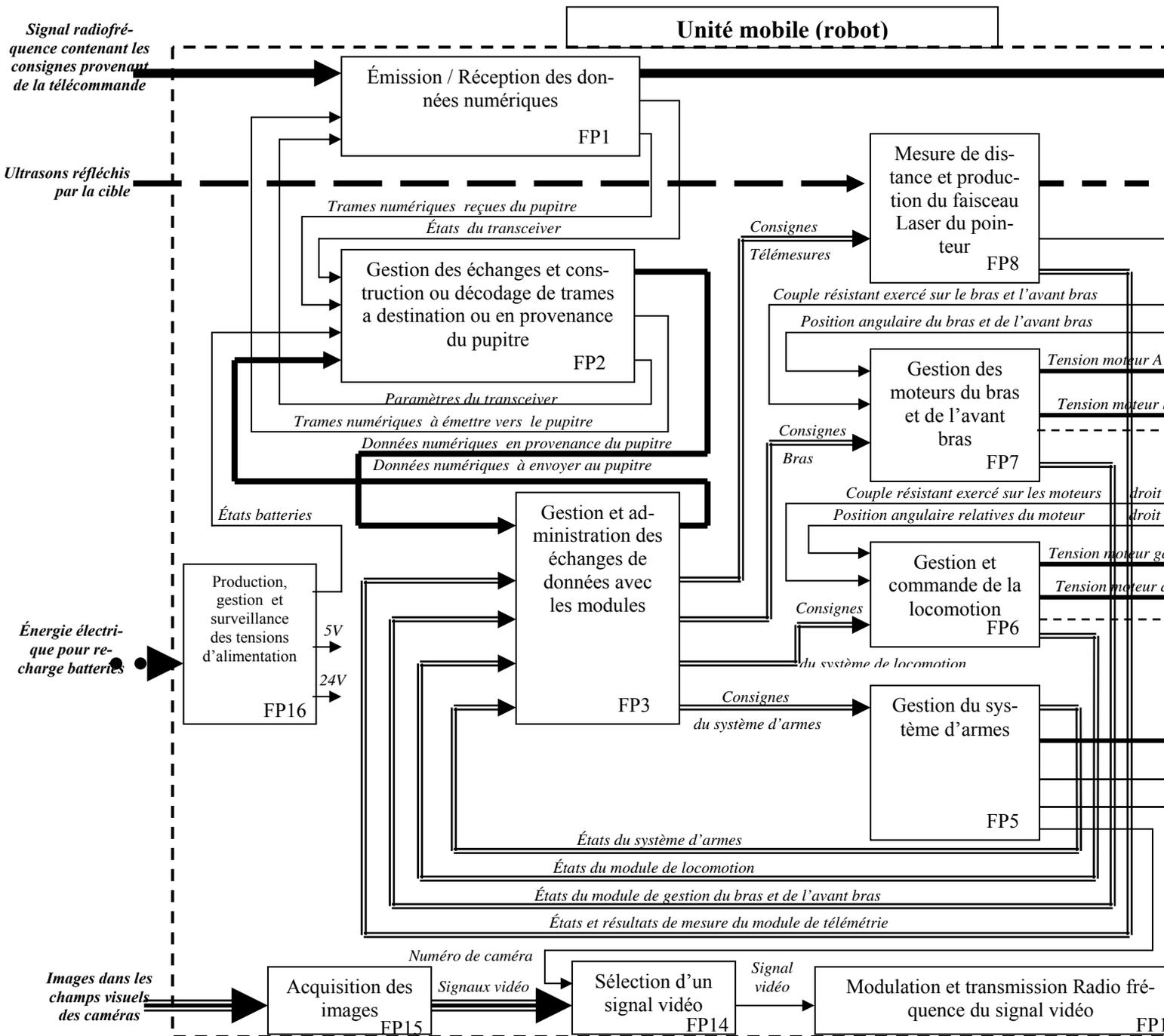
Afin de faciliter l'analyse de l'architecture de l'ensemble du système par l'électronicien, seuls les schémas fonctionnels de niveau 1 de la valise et du robot sont fournis ci après.

Il appartient au candidat d'associer les signaux ou informations d'entrées sorties des schémas fonctionnels aux acteurs définis dans le modèle UML.

Il est rappelé que l'architecture fonctionnelle ne permet pas de distinguer le traitement logiciel du traitement matériel associé à chaque fonction.

D'autre part, l'approche fonctionnelle étant orientée « flot de données », les architectures matérielles des BUS ne sont pas déductibles des représentations.





SUJET 10

A	MODELISATION ET ANALYSE DU FONCTIONNEMENT	10
A.1	Analyse du système	10
A.2	Le sous système robot	10
A.3	Le sous-système Valise	11
A.4	Un contexte temps réel	11
A.5	Exploitation pédagogique	11
B	Analyse de la transmission des données	13
B.1	Etude du principe de modulation du MODEM	13
B.2	Etude du modulateur intégré	15
B.3	Etude du récepteur intégré	18
B.4	Exploitation pédagogique	19
C	Analyse et implémentation de l'acteur Locomotion	20
C.1	Etude de la structure matérielle de la carte	20
C.1.1	Etude de l'alimentation des moteurs	20
C.1.2	Mesure et conversion du courant moteur	21
C.1.3	Présentation de l'asservissement	21
C.2	Etude de la structure logicielle de la carte	22
C.2.1	Mesure de la vitesse	22
C.2.2	Mesure du courant	23
C.2.3	Implémentation des correcteurs	23
C.3	Exploitation pédagogique	24
C.3.1	Présentation de la commande MLI en STI génie électronique	24
C.3.2	Implémentation et test d'une carte de variation de vitesse en STS Systèmes Electroniques	24

SUJET

MODELISATION ET ANALYSE DU FONCTIONNEMENT

ANALYSE DU SYSTÈME

L'approche de l'architecture logicielle du robot fait apparaître des diagrammes modèles écrits en langage UML (Unified Modeling Language) qui sont utilisés en particulier dans la description de projets sur la base d'une programmation objet. Certains modèles décrivent la structure statique du système étudié, d'autres la structure dynamique.

Q1. Généralités sur la modélisation

Citez les différents diagrammes utilisés dans le langage UML en précisant à quelle catégorie ils appartiennent et quel est leur rôle respectif.

L'enrichissement du modèle se fait par une approche progressive de la solution tout en maintenant une structure logicielle opérationnelle.

Dans ces conditions comment qualifiez vous la méthode à mettre en œuvre pour réaliser complètement le projet ?

Quelle stratégie de test allez-vous développer pour vérifier la conformité de votre système ?

LE SOUS SYSTÈME ROBOT



On souhaite compléter le modèle du robot tel qu'il est décrit dans la présentation afin de préciser certaines fonctionnalités.

Un détour s'impose par la classe IT dont le rôle est d'envoyer un événement toutes les 100 ms et les 3 s et de gérer des chiens de garde. Pour ce faire elle reçoit un événement appelé Tick, fourni par un composant spécialisé.

Q2. Description des méthodes de gestion du temps

- Donnez les algorithmes des méthodes 100ms() et 3s() permettant d'envoyer les événements correspondants.**
- Comment doit être évaluée la valeur du tick ?**
- Décrivez par un algorithme la gestion d'un chien de garde, en précisant son rôle, ses paramètres et les signaux nécessaires à son utilisation.**
- Décrivez la méthode trame().**
- Quel est le rôle de l'attribut CPT ? Définissez son format.**

Nous avons vu que la classe TC a pour rôle de gérer la trame TramTCrv reçue de la valise.

Cette méthode permet d'extraire les données TCrv qui vont être partagées en autant de structures TCrut. Ces données, encapsulées dans des trames TramTCrut, permettent d'assurer le pilotage de chacune des unités de traitement.

Q3. Description des attributs de la classe TC

Décrivez et donnez les déclarations avant algorithme des structures de données des différents attributs de la classe TC.

Vous donnerez très précisément le nombre et le contenu de chacun des attributs TCrut.

Concentrons nous maintenant sur la méthode Modbus. A partir des documents fournis en annexe, vous vous intéresserez à la notion de fonctionnement en maître esclave et au rôle du contrôle de CRC des trames.

Q4. Le protocole Modbus

Donnez le principe du fonctionnement d'une communication réseau en Maître/Esclave.

Quels sont les intérêts et les inconvénients de ce type de fonctionnement ?

Qu'apporterait l'utilisation d'un protocole probabiliste dans notre cas et quel en serait son inconvénient principal ?

Q5. Le contrôle de CRC

A quoi sert un contrôle de CRC dans une trame réseau ?

Précisez le principe de son utilisation.

Donnez en langage formel de type algorithmique la méthode permettant d'évaluer le CRC d'une trame Modbus dont le principe est fourni en annexe.

LE SOUS-SYSTÈME VALISE



Q6. Analyse de la valise

Pour ce sous-système dont le diagramme de contexte est fourni dans la présentation et en vous aidant de la description du sous système robot :

Etablir le diagramme état/transition spécifiant le comportement de la classe générique valise.

Etablir le diagramme des classes du logiciel de gestion de la Valise.

UN CONTEXTE TEMPS RÉEL

L'analyse du logiciel du robot fait apparaître dans le diagramme état/transition qu'il peut y avoir parallélisme de fonctionnement donc concurrence entre deux séquences initiées d'une part par l'état "Traitement/Elaboration Trame rut" et d'autre part par l'état "Réception Trame rv".

Q7. Nous nous trouvons face à un problème de gestion multitâche concurrente qui ne peut être traité de manière triviale.

Comment envisagez-vous de traiter un tel problème ? Indiquer les critères de choix permettant de gérer ce problème.

Déterminer quels vont être les états qui pourront être mis en séquence dans une même unité d'exécution (Tâche ou Thread).

Déterminer les priorités respectives de chacune des unités d'exécution.

Donner le chronogramme d'exécution de chacune de ces unités.

Qu'attendez-vous du mécanisme de séquençement des unités d'exécution ?

EXPLOITATION PÉDAGOGIQUE

Elaboration des documents de présentation d'un système

Il est envisagé d'exploiter ce système afin d'illustrer les concepts mis en jeu dans les unités d'entrées sorties d'une part, dans la transmission des données d'autre part. Dans cette partie, il est demandé au candidat de préparer l'analyse du sous-système Valise et de prévoir les documents de présentation associés. Le public sera choisi dans des sections de STS IRIS. Ces documents pourraient être utilisés lors de différentes séquences d'enseignement.

Q8. A partir du diagramme de contexte fourni dans la présentation, faire la mise en situation générale (c'est-à-dire restreindre et délimiter le système étudié pour illustrer un ensemble de concepts, définir le système dans son contexte).

Q9. Élaborer les principaux schémas de présentation associés (schémas fonctionnels, schéma d'architecture matérielle, diagrammes UML, algorithmes, etc.).

Q10. Expliciter les caractéristiques principales retenues pour encadrer le travail des élèves (caractéristiques fonctionnelles, matérielles ou comportementales, liées au système étudié).

Attentes du jury

Pour les documents de présentation réclamés, on attend une production maximale de 4 pages format A4.

Critères d'évaluation du candidat :

- L'exactitude technique des documents présentés et le respect du système proposé,
- La pertinence pédagogique de la mise en situation choisie et des caractéristiques principales retenues,
- La cohérence et la pertinence pédagogique des représentations utilisées au niveau choisi,
- La pertinence des choix des travaux proposés et des résultats attendus des élèves,
- La qualité des descriptions et des explications proposées (exactitude technique, précision et concision, expression écrite, adéquation par rapport au contexte).

Analyse de la TRANSMISSION des données

ETUDE DU PRINCIPE DE MODULATION DU MODEM

On souhaite étudier le principe de modulation et de codage des données binaires afin de caractériser les contraintes à prendre en compte pour la reconstruction du message par le récepteur.

On rappelle que les échanges de données numériques entre la Valise et le Robot se font en half-duplex.

On note $m(t)$ le signal binaire modulant (signal informatif à transmettre).

Hypothèses simplificatrices :

- Dans la suite, sauf indication contraire, on suppose les transitions de fréquence instantanées lors d'un changement d'état logique du signal modulant (on néglige notamment le temps de réponse et les régimes transitoires du synthétiseur de fréquence).
- On considère que l'amplitude du signal $m(t)$ a la valeur unité ($M_{\max} = 1 \text{ V}$) lorsque le bit à transmettre est un 1 logique et une amplitude nulle lorsque le bit à transmettre est un 0 logique.

Q11. Généralités

- a) Identifier les fonctions principales de l'unité mobile impliquées directement dans l'échange de données numériques par voie hertzienne.
- b) Rappeler les contraintes temporelles associées à une transmission HALF-DUPLEX.
- c) Identifier le modulateur / démodulateur intégré chargé de la transmission HF.
- d) Compléter le tableau du document réponse DR1, en indiquant pour chaque signal de l'interface numérique du CI concerné, son rôle, sa direction, puis indiquer la fonction des différents bus associés.

Q12. Expression du signal modulé

L'expression de la porteuse est : $V_p(t) = V_{\max} \cdot \sin(2\pi \cdot f_0 \cdot t + \varphi_0)$.

Donner l'expression générale du signal $V_m(t)$ modulé en fréquence par un signal $m(t)$ faisant apparaître le terme Δf où,

$\Delta f = f_1 - f_0$ où f_1 est la fréquence associée à $m(t)=1$ et f_0 , la fréquence associée à $m(t)=0$.

Proposer une méthode de mesure permettant de relever le spectre COMPLET du signal modulé. Proposer un schéma en faisant apparaître les appareils utilisés et leur branchement sur la carte de l'émetteur. Quelle doit être la contrainte sur $m(t)$ pour visualiser ce spectre ?

Dans la suite $\varphi_0=0$.

Q13. Etude du codage de l'élément binaire utilisé pour le signal modulant

On note T_b le temps de transmission d'un bit fixant ainsi le rythme binaire du signal modulant.

Hypothèse simplificatrice : On suppose équiprobable l'apparition d'un 1 ou d'un 0 sur le signal modulant noté $m(t)$ (considéré comme un signal aléatoire à nombre d'états finis) pendant T_b , de plus, on suppose $m(t)$ stationnaire et ergodique d'ordre 2.

Quelle est alors la relation liant la densité spectrale bilatérale d'énergie normalisée du signal $m(t)$, noté $G(f)$ à sa fonction d'auto-corrélation (ici égal à sa covariance) noté $\Phi_{mm}(\tau)$ (où τ représente le retard de corrélation ($-\infty < \tau < +\infty$)). Donner le nom de ce théorème.

Donner la définition de la fonction d'auto corrélation de $\Phi_{mm}(\tau)$ en fonction de $m(t)$ et τ .

On définit $P1(\tau)$ la probabilité que $m(t).m(t - \tau) = 1$ dans l'intervalle de temps $[t_0, t_0 + \tau]$, où t_0 représente l'origine de temps des réalisations de $m(t)$ (t_0 correspond donc toujours au début de la transmission d'un caractère).

On rappelle que la probabilité ($P0(\tau)$) d'avoir $m(t).m(t - \tau) = 0$ dans le même intervalle de temps est alors égale à $(1 - P1(\tau))$.

On peut montrer que la relation définissant la fonction d'auto corrélation $\Phi_{mm}(\tau)$ de $m(t)$ peut se mettre sous la forme $\Phi_{mm}(\tau) = P1(\tau)$ si l'on considère qu'aucune puissance n'est contenue dans le signal $m(t)$ lorsque $m(t)=0$.

Compléter le tableau du document réponse DR2 en explicitant la valeur de $P1(\tau)$ et de $\Phi_{mm}(\tau)$ pour les intervalles de temps indiqués.

Montrer que $\Phi_{mm}(\tau)$ peut se mettre sous la forme

$$\Phi_{mm}(\tau) = \frac{1}{4} + \frac{Tri_{T_b}(\tau)}{4} = \frac{1}{4} + \frac{1}{4} \left(2 - \frac{\tau}{T_b} \right)$$

en fonction de τ et T_b pour toute la plage de variation de τ

($-\infty < \tau < +\infty$) puis tracer $\Phi_{mm}(\tau)$.

Exprimer $G(f)$ puis tracer cette fonction sur le document réponse DR3.

Q14. Analyse des résultats et conséquences de ce type de codage

On se place en sortie du démodulateur, où l'on se propose d'étudier les contraintes de décodage du signal $m(t)$.

A partir de la représentation graphique de $G(f)$, indiquer si il est possible d'isoler la fréquence associée au rythme binaire T_b par un simple filtrage fréquentiel. A partir de l'expression de $G(f)$, justifier ce résultat. Expliquer l'intérêt que peut présenter ce type d'opération.

Déduire le paramètre commun, dépendant de T_b à fixer obligatoirement sur le récepteur et sur l'émetteur pour rendre la transmission de donnée cohérente.

Montrer que le résultat précédent peut être également appliqué aux liaisons RS485 utilisés pour le réseau MODBUS RTU du robot.

Quel avantage offre le codage Manchester au regard du codage exploité dans ce système ? Quelle application directe de cet avantage est utilisée dans les réseaux Ethernet ? Justifier et donner un cas concret.

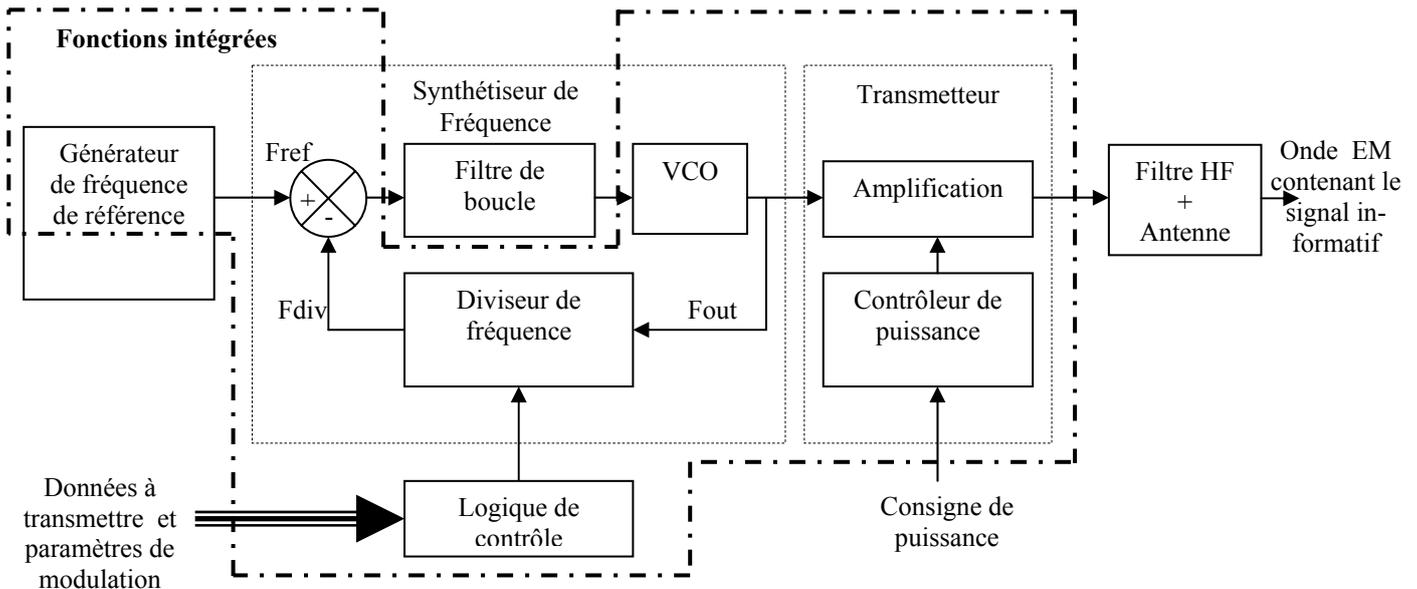
ETUDE DU MODULATEUR INTÉGRÉ

On s'intéresse au modulateur de fréquence intégré au circuit identifié précédemment.

Hypothèse simplificatrice : Sauf indication contraire, l'étude des différents éléments se fera autour du point de fonctionnement nominal, boucle verrouillée.

Q15. Etude de la structure du modulateur

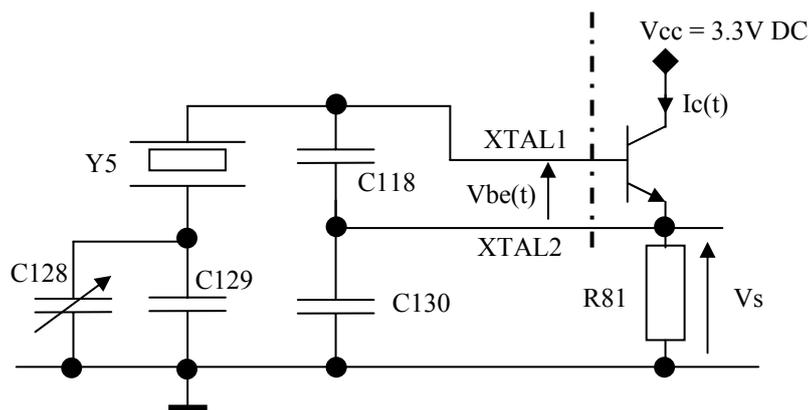
Schéma bloc du modulateur de fréquence



- Quel est le rôle du synthétiseur de fréquence ? Rappeler le nom de la structure utilisée pour le réaliser, puis expliciter brièvement le rôle de chacune des fonctions qui le compose.
- Pour quelle raison la donnée à transmettre a-t-elle une action sur le diviseur de fréquence ? Expliquer simplement le fonctionnement du modulateur de fréquence en faisant intervenir le signal modulant $m(t)$.
- Donner et expliquer la structure d'une trame destinée au paramétrage du Circuit intégré étudié ici en provenance du microcontrôleur. Expliciter le principe de transmission entre le microcontrôleur et le circuit étudié.

Q16. Étude du générateur de fréquence de référence

On donne le schéma simplifié du générateur de fréquence de référence (les composants internes au CI utiles à la polarisation du transistor n'apparaissent pas) :



Pour le point de polarisation choisi qui impose V_{be0} et I_s (courant de saturation du transistor), lorsque les oscillations existent à la fréquence f_0 on admet que la tension $V_{be}(t)$ peut s'écrire sous la forme :

$$V_{be}(t) = V_{be0} + V_1 \cdot \cos(\omega_0 t)$$

Montrer que la relation liant le courant collecteur (noté $I_c(t)$) à la tension $V_{be}(t)$ peut s'écrire sous la forme suivante en explicitant les différents termes. Préciser l'ordre de grandeur de V_T pour une température de 300 K. Justifier.

$$I_c(t) = I_s \cdot \exp\left(\frac{V_{be0}}{V_T}\right) \cdot \exp\left(\frac{V_1 \cdot \cos(\omega_0 t)}{V_T}\right) = I_s \cdot \exp\left(\frac{V_{be0}}{V_T}\right) \cdot \sum_n a_n \cdot \cos(n\omega_0 t)$$

Etablir le schéma équivalent en petits signaux du transistor bipolaire (sans faire apparaître les impédances parasites) et montrer qualitativement que ce modèle peut alors être considéré comme un amplificateur à transconductance de facteur d'amplification noté g_m dans certaines conditions qu'il est demandé d'expliciter.

Donner le nom du type d'oscillateur utilisé ici. En utilisant le modèle du transistor qui vient d'être établi, donner le schéma équivalent de ce montage pour les petits signaux. Faire clairement apparaître le modèle équivalent du quartz).

Mettre en évidence la chaîne d'amplification ainsi que le réseau de contre-réaction.

Dans la suite, on négligera les éléments modélisant les pertes du quartz.

On donne les valeurs numériques des éléments de la branche série du quartz :

$L_y = 0,00804$ H, $C_y = 30$ fF.

Pour la branche parallèle : $C_{yp} = 8$ pF

- e) **Quel est obligatoirement le type d'impédance du quartz pour que les oscillations existent ? Justifier votre réponse en exploitant les modèles équivalents des questions précédentes.**
- f) **Exprimer littéralement la fréquence d'oscillation en fonction des éléments du montage. Montrer que cette fréquence est réglable. Calculer numériquement les extrema de réglage de cette fréquence.**
- g) **On souhaite régler manuellement la fréquence d'oscillation du montage à l'aide d'un oscilloscope. Proposer une méthode de réglage, faisant apparaître le mode opératoire, ainsi que l'ensemble des appareils de mesures utilisés. On veillera à exposer clairement les précautions à prendre pour effectuer cette opération. Proposer un schéma représentant le circuit de mesure.**

Q17. Étude du synthétiseur de fréquence

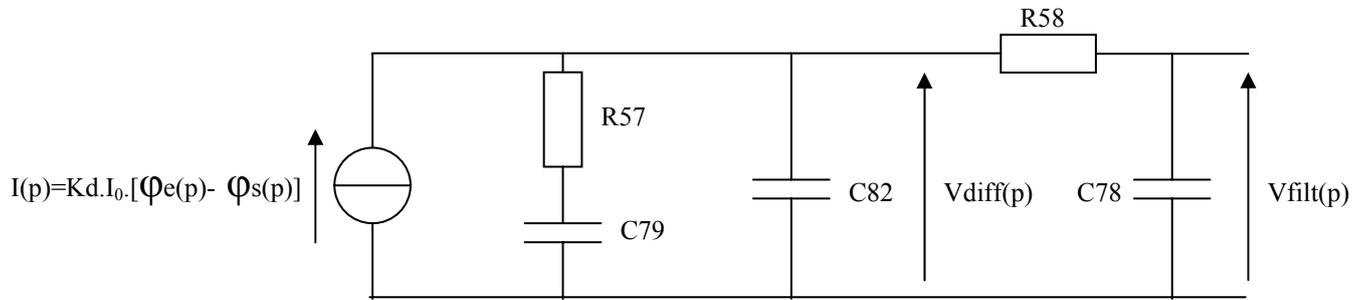
On cherche à évaluer le rythme binaire maximum du signal modulant en analysant la fonction de transfert du synthétiseur de fréquence.

Le comparateur de phase à pompe de charge est chargé par le filtre placé entre les broches 41 (FILT1) et 42 (VCON) (Par souci de clarté, le modèle du générateur de courant a été simplifié).

Le développement de Taylor de l'expression liant la fréquence en sortie du VCO (f_{OUTVCO}) à sa tension de commande (V_{evco}) autour du point de fonctionnement est donné ci-dessous :

$$f_{OUTVCO} = f_{VCO0} + K_{VCO} \cdot V_{evco} \quad \text{où } K_{VCO} = 2,67 \text{ MHz} \cdot \text{V}^{-1}, f_{VCO0} = 433 \text{ MHz.}$$

On modélise, dans l'espace de Laplace, l'ensemble comparateur de phase – filtre de boucle avec le schéma électrique équivalent suivant :



Avec :

$$Kd.I_0 = 225 \cdot 10^{-6} \text{ A/rad},$$

$\Phi_e(p)$: la phase instantanée du signal d'entrée,

$\Phi_s(p)$: la phase instantanée du signal de sortie de la boucle

$V_{filt}(p)$: la tension de sortie de l'ensemble comparateur de phase – filtre de boucle.

Exprimer littéralement $V_{filt}(p)$ en fonction de $\Phi_e(p) - \Phi_s(p) = \Delta\Phi(p)$ et des éléments du montage puis donner la fonction de transfert correspondante sous forme canonique et numérique.

On montre que la fonction de transfert précédente peut se mettre sous la forme :

$$T_{filt}(p) = \frac{V_{filt}(p)}{\varphi_e(p) - \varphi_s(p)} = \frac{k}{p} \times \frac{(1 + \tau_d \cdot p)}{(1 + \tau_1 \cdot p) \cdot (1 + \tau_2 \cdot p)}$$

On donne :

$$\tau_d \approx 18,48 \mu\text{s}$$

$$\tau_1 \approx 1,722 \mu\text{s}$$

$$\tau_2 \approx 394 \text{ ns}$$

$$k \approx 36,437 \cdot 10^3 \text{ V/rad}$$

Sauf indication contraire, on prendra dans la suite le rapport N/D = 0,02366.

Compléter le schéma bloc du document réponse DR4, liant l'expression de la fréquence instantanée $F(p)$ à la phase instantanée $\Phi(p)$. Dans le cas particulier où $f(t) = \text{Constante} = f_c$, exprimer $\Phi(p)$ en fonction $F(p)$.

Compléter le schéma – bloc du document réponse DR5 en faisant apparaître les fonctions de transfert. Tracer sur le document réponse DR6, les diagrammes de Bode asymptotiques et approchés de gain et de phase de la fonction de transfert en boucle ouverte $T_{BO}(f) = F_{div}(f) / \mathcal{E}(f)$, puis déterminer graphiquement les marges de phases et de gain ainsi que les fréquences associées à chacune de ces marges. Discuter de la stabilité de la boucle.

On montre que la fonction de transfert simplifiée en boucle fermée $F_{out}(p)/F_{ref}(p)$ peut se mettre sous la forme suivante :

$$\frac{F_{out}(p)}{F_{ref}(p)} = T_{BF}(p) = \frac{D}{N} \frac{(1 + \tau_d \cdot p)}{\left(1 + \frac{2m}{\omega_0} p + \frac{p^2}{\omega_0^2}\right) \cdot (1 + \tau_b \cdot p) \cdot (1 + \tau_c \cdot p)}$$

$$\tau_d \approx 18,48 \mu\text{s}$$

$$\tau_b \approx 14,4 \mu\text{s}$$

$$\tau_c \approx 382 \text{ ns}$$

$$\omega_0 \approx 344,174 \cdot 10^3 \text{ rad/s}$$

$$m \approx 0,636$$

Expliquer l'influence du polynôme numérateur sur les comportements dynamiques et harmoniques de la boucle. Quelle méthode de correction a été envisagée par le concepteur ? Justifier.

Déterminer les erreurs statique, de traînage puis d'accélération du synthétiseur de fréquence. Conclure sur la précision de cet asservissement.

On suppose le signal modulant de type binaire. Expliquer brièvement pourquoi le temps de réponse à 1% permet d'approximer le rythme binaire théorique maximum de $m(t)$.

On montre que la réponse temporelle indicielle de la PLL à un échelon de fréquence Δf lié à une variation instantanée (mais suffisamment faible) du rapport N/D peut être approximée par :

$$f_{out}(t) = \Delta f - \frac{\Delta f}{\sqrt{1-m^2}} \cdot e^{(-m \cdot \omega_0 \cdot t)} \cdot \cos(\omega_0 \cdot \sqrt{1-m^2} \cdot t + \varphi)$$

Le concepteur a choisi un débit binaire de 19200 bits par secondes pour une excursion en fréquence de 5 KHz, justifier ce choix.

Expliciter qualitativement les conséquences de l'analyse qui vient d'être faite sur le spectre du signal modulé. Mettre en évidence les avantages et les défauts de ce type de synthétiseur.

Calculer le dépassement de fréquence maximum atteint lors du régime transitoire de la réponse indicielle précédente.

Q18. Étude de l'adaptation de puissance

On souhaite obtenir une puissance de sortie du transmetteur de +14 dBm dans la bande des 433MHz, Donner l'ensemble des paramètres et composants à fixer en les identifiant puis en précisant leurs valeurs pour obtenir ce résultat. Exprimer en milliwatts la puissance de sortie correspondante.

L'antenne présente une amplification de puissance de +2 dBi, à la fréquence nominale. Définir le dBi.

Calculer la puissance du signal émis dans la bonne direction.

ETUDE DU RÉCEPTEUR INTÉGRÉ

Q19. Principe de fonctionnement du récepteur

a) Donner un schéma fonctionnel simplifié du récepteur intégré. Indiquer le type et le principe de fonctionnement de ce récepteur.

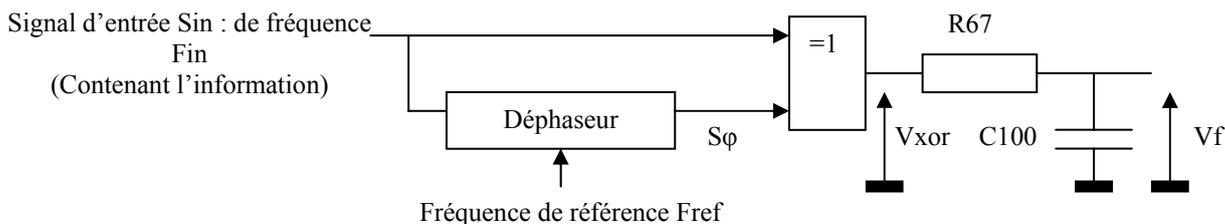
On donne la forme du signal reçu : $V_r(t) = A_r \cdot \cos[2\pi[f_c + m(t) \cdot \Delta f] \cdot t]$

b) Donner l'équation du signal en sortie de chaque étage de changement de fréquence (après filtrage) et montrer l'intérêt de ce type de structure au regard des variations relatives de fréquences et des caractéristiques des composants utilisés dans ce système.

c) Donner le principe de fonctionnement d'un filtre SAW. Quel est l'intérêt de ce type de filtre ?

Q20. Étude du discriminateur de fréquence

On donne le synoptique du discriminateur de fréquence intégré :



S_{in} est un signal périodique rectangulaire de fréquence F_{in} et d'amplitude E de 3 V.
 $V_{oh_{min}}$ de la porte XOR = 3 V = E .

Avec le signal S_{ϕ} identique à S_{in} mais déphasé de $\Phi_{S_{\phi}}$.

$\varphi_{S\phi}$ est liée à F_{in} et F_{ref} par la relation (développement de Taylor limité à l'ordre 1 de la fonction de transfert du déphaseur pour de faibles variations de F_{in} autour de F_{ref}) :

$$\varphi_{S\phi} = 2,73 \cdot ((F_{in}/F_{ref}) - 0,8).$$

On rappelle que $F_{in} = F_{ref} + m(t) \cdot \Delta f$

Expliciter le rôle de cette fonction.

Exprimer le rapport cyclique α du signal V_{xor} en fonction de $m(t)$, puis en déduire l'expression de la valeur moyenne de $V_f(t)$.

Donner la sensibilité (en V/kHz) de ce discriminateur de fréquence pour $F_{ref} = 455$ kHz, puis calculer $\langle V_f(t) \rangle$ pour une excursion en fréquence du signal reçu de 5 kHz.

Q21. Principe du « conditionneur de données » (DataSlicer)

- Expliciter le rôle de cette fonction et indiquer son principe de fonctionnement.**
- Compte tenu du type de codage de l'information binaire utilisé pour $m(t)$, donner le mode de fonctionnement du « conditionneur de données », sachant que l'on n'exclut pas la transmission successive et prolongée de nombreux bits identiques (suite de 0 ou de 1).**

Exploitation pédagogique

On souhaite exploiter le sous-système qui vient d'être étudié afin d'introduire la transmission de données numériques en **STS Systèmes Electroniques**.

On s'intéresse au champ technologique TELECOMMUNICATION, TELEPHONIE ET RESEAUX TELEPHONIQUES pour développer le questionnement pédagogique demandé.

L'approche sera limitée à la transmission de données par voie hertzienne en modulation de fréquence et aux concepts abordés dans l'extrait de référentiel fourni en annexe.

Q22. Proposer une problématique et une mise en situation permettant d'introduire ce mode de transmission en prenant pour support ce système. Délimiter soigneusement l'analyse et l'étude proposée aux étudiants. Préciser les supports pédagogiques utilisés.

Q23. Élaborer les structures des séquences et progressions pédagogiques, en mettant en évidence les connaissances à mobiliser ou à développer pour atteindre les objectifs du référentiel. Détailler les déroulements et les objectifs intermédiaires des différentes activités.

Q24. Proposer une approche critique des concepts abordés dans votre développement pédagogique au regard de l'état de l'art et en faisant l'analogie avec des systèmes utilisés dans la vie quotidienne (télévision numérique, réseaux, etc.). Expliciter les contraintes et limites technologiques ou théoriques de votre approche vis-à-vis du niveau des étudiants de STS SE.

Attentes du jury :

On attend une production maximale de 2 à 4 pages format A4.

Critères d'évaluation du candidat :

L'exactitude technique des documents présentés et le respect du système proposé,

La pertinence pédagogique de la mise en situation choisie et des caractéristiques principales retenues,

La justification des contraintes matérielles et temporelles,

La validité et la réalité technologique des concepts abordés,

Le respect des exigences du référentiel,

La qualité des descriptions et des explications proposées (exactitude technique, précision et concision, expression écrite, adéquation par rapport au contexte).

Analyse et implémentation de l'acteur Locomotion

Dans cette partie nous allons nous placer dans la situation de l'électronicien qui doit implémenter une carte de pilotage de moteurs asservis en vitesse ou position à partir d'une consigne reçue par un canal de transmission Modbus. Sachant que la même carte est utilisée pour la propulsion et pour le positionnement d'accessoires motorisés, notre étude porte sur le pilotage en vitesse pour la locomotion du robot.

Etude de la structure matérielle de la carte

Indications techniques :

- Le schéma de la carte est fournie en annexe.
- La fréquence des signaux MLI est fixée à 613 Hz.
- La DEL D10 s'allume lorsque l'un des moteurs rencontre une surcharge en couple.
- Les vitesses de rotation sont exprimées en radian par seconde.
- Les moteurs sont de type S220F du constructeur PARVEX équipés de freins à manque de courant et d'un codeur incrémental solidaire de l'axe moteur de 1024 points par tour, délivrant deux signaux en quadrature de phase, disponibles sur des sorties à collecteur ouvert de transistors PNP.
- Lorsque les moteurs sont à l'arrêt (tension d'alimentation nulle), le frein doit impérativement être activé.
- L'axe 1 correspond au moteur gauche et l'axe 2 au moteur droit du robot.
- Si $AXE2PHA = AXE1PHA = 1$ et $AXE2PHB = AXE1PHB = 0$ le robot avance en ligne droite à vitesse maximale.
- Si le signal $BRAKES = 1$, alors, les deux freins moteurs à manque de courant sont actifs.

C.1.1 Etude de l'alimentation des moteurs

La carte variateur fonctionne en mode locomotion :

- le contenu de l'adresse 0x0011 de la table d'échange MODBUS représente la consigne de vitesse de déplacement du robot :
0x0011 > 0 : avance, 0x0011 = 0 : manœuvre sur place, 0x0011 < 0 marche arrière
- le contenu de l'adresse 0x0012 de la table d'échange MODBUS représente la consigne de direction de déplacement du robot :
0x0012 > 0 : virage à droite, 0x0012 = 0 : tout droit, 0x0012 < 0 virage à gauche.

L'axe 1 correspond au moteur gauche et l'axe 2 au moteur droit du robot.

Q25. Commande d'un pont en H

Sauf indication contraire, on s'intéresse à la commande de l'axe 2, le principe de commande de l'axe 1 étant similaire.

- a) **Donner la relation liant la tension moyenne aux bornes du moteur au rapport cyclique α des signaux AXEPH2A ou AXEPH2B, sachant que pour un sens de rotation donné, l'un des deux signaux est en permanence au 0 logique (on négligera la chute de tension dans la résistance shunt).**

Les signaux MLI permettant de piloter l'axe 2 sont produits par le Timer 0 de l'ATMEGA88 fonctionnant en mode « Phase Correct PWM » avec une résolution de 8 bits, le compteur évoluant entre 0 et 255.

- b) **Identifier les registres du Timer0 de l'ATMega88 mis en jeu et déterminer leur contenu pour obtenir le fonctionnement souhaité pour chaque sens de rotation. Préciser le facteur de pré division N à appliquer au signal d'horloge interne ($f_{clk-I/O}$).**
- c) **Exprimer le rapport cyclique α en fonction des contenus des registres OCR0A et OCR0B, puis montrer que le sens de rotation du moteur peut être fixé à l'aide de ces deux registres.**
- d) **On souhaite asservir la vitesse de rotation. Montrer que suivant le sens de rotation souhaité, il faudra sélectionner le registre à piloter.**
- e) **Sachant que l'autre pont en H est piloté de manière similaire par les sorties OC1A et OC1B (cf. schéma électrique) correspondant respectivement aux registres OCR1A et OCR1B du Timer1 de l'ATMega88, compléter le tableau du document réponse DR7.**

C.1.2 Mesure et conversion du courant moteur

Sauf indication contraire, on s'intéresse à l'axe 2, le principe de mesure du courant de l'axe 1 étant similaire.

Q26. Etude de la chaîne analogique

- Donner la fonction de transfert liant le courant moteur à la tension IAXE2.
- Sachant que l'entrée du CAN intégré contient un suiveur, montrer que la tension IAXE2 représente approximativement la valeur moyenne sur une période MLI du courant moteur.
- Donner la relation liant le couple moteur au courant moteur, à l'aide des documents constructeur. Exprimer numériquement cette relation.
- Quelle peut être l'utilité du signal DGAXE2 ? Expliquer.

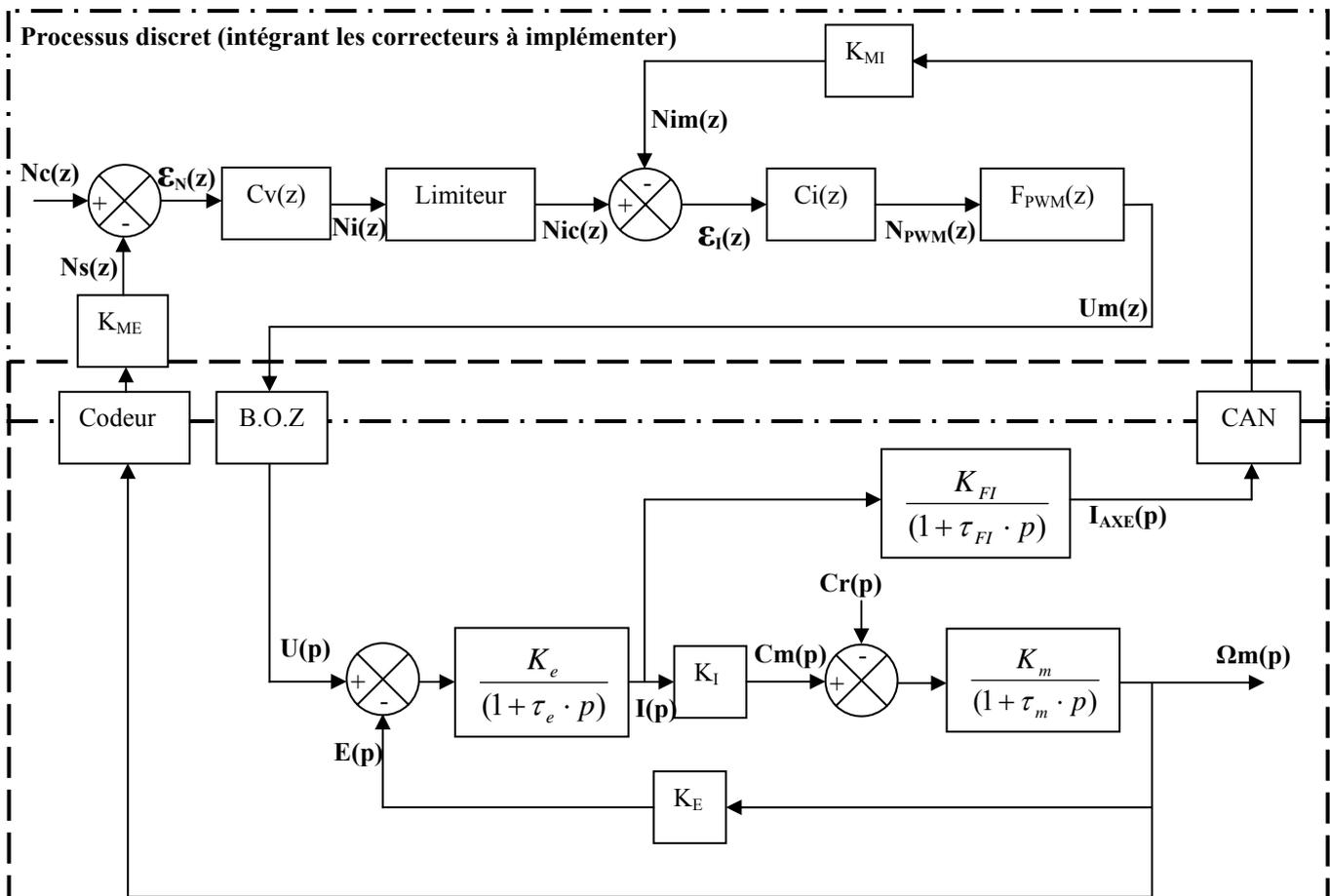
Q27. Etude de l'acquisition de l'information courant moteur par le microcontrôleur

- Donner la plage de variation du courant et de couple moteur mesurable par le microcontrôleur (la tension de référence du CAN est de 5V). Justifier.
- Donner la plus petite variation de couple mesurable par le microcontrôleur.
- Quelle est l'atténuation (en dB) du fondamental du signal MLI ? Quelle est l'influence de ce signal sur la précision de la mesure ? Proposer une méthode numérique permettant d'améliorer cette précision.
- Calculer la tension IAXE2 pour le couple nominal du moteur.

C.1.3 Présentation de l'asservissement

L'objectif de cette partie est de modéliser la boucle d'asservissement de vitesse et de déterminer les équations de récurrence. Celle-ci permettent d'implémenter les algorithmes des correcteurs numériques équivalents à $C_v(z)$ et $C_i(z)$ (sans calculer leurs paramètres) dans le microcontrôleur.

Schéma bloc du modèle de l'asservissement de vitesse du moteur gauche :



Chaîne électromécanique de locomotion du robot : processus continu

- L'automaticien a choisi d'utiliser des correcteurs numériques PID ($C_v(z)$) et PI ($C_i(z)$) pour optimiser le pilotage du système et l'adaptabilité de l'algorithme de calcul.
- On notera T_e la période d'exécution des algorithmes de correction cherchés.

- $N_{im}(z)$ est un nombre entier qui représente le courant moteur avec une précision de 10 mA ($N_{im} = 1 \Rightarrow I = 10 \text{ mA}$).
- $N_s(z)$ est un nombre entier qui représente la vitesse de rotation du moteur avec une précision de 0,1 radian par seconde ($N_s = 1 \Rightarrow \Omega_m = 0,1 \text{ rad/s}$).

Q28. Modèle du processus continu et éléments d'analyse du comportement dynamique

On donne les paramètres mécaniques de la chaîne cinématique de propulsion du robot ramenés sur l'axe moteur :

Moment d'inertie $J_m = 2,9 \text{ kg.m}^{-1}$

Coefficient de frottement visqueux $K_{fv} = 1,33 \cdot 10^{-5} \text{ N.m.rad}^{-1}.s$.

Les roues ont un diamètre de 26 cm et sont reliées à l'axe moteur par un réducteur équivalent à la chaîne cinématique complète (moto réducteur planétaire, galet de friction, etc.) de rapport $1/13^{\text{ième}}$.

- En vous aidant des résultats des questions précédentes et des documents constructeurs, exprimer littéralement puis numériquement l'ensemble des paramètres des modèles analogiques (moteur, chaîne de mesure du courant, etc.).
- Que représente l'excitation externe $Cr(p)$? Donner un exemple concret provoquant une variation de $Cr(p)$.

La grandeur $N_{PWM}(z)$ représente le contenu de l'un des registre OCRxx.

- Exprimer la relation liant N_{PWM} à la tension moyenne aux bornes du moteur pour un sens de rotation fixé et justifier la présence du bloqueur d'ordre zéro (B.O.Z.).
- Expliquer brièvement l'intérêt, du point de vue des performances de l'asservissement, de la boucle imbriquée de régulation de courant.
- Calculer le temps que met le robot départ arrêté pour atteindre la vitesse de 1 m/s sur terrain plat si le couple moteur reste égal à sa valeur nominale lors de la phase d'accélération (supposée constante).

Q29. Extraction des équations de récurrence

- Donner les valeurs numériques des coefficients K_{MI} et K_{ME} .

On donne la forme général des correcteurs $C_v(z)$ et $C_i(z)$:

$$C_v(z) = K_{cv} \cdot \left(1 + \frac{T_e}{T_{iv}} \cdot \frac{1}{z-1} + \frac{z-1}{K_{dv} \cdot (z-z_0)} \right)$$

Où :

T_{iv} est la constante d'intégration

K_{dv} : paramètre de mise à l'échelle de l'action dérivée

K_{cv} : gain statique du correcteur

Z_0 : pôle d'adoucissement de l'action dérivée

$$C_i(z) = K_{ci} \cdot \left(1 + \frac{T_e}{T_{ii}} \cdot \frac{1}{z-1} \right)$$

Où :

T_{ii} est la constante d'intégration

K_{ci} : gain statique du correcteur

- Exprimer la relation de récurrence liant $N_i(kT_e)$ à $\mathcal{E}_N(kT_e)$.
- Exprimer la relation de récurrence liant $N_{PWM}(kT_e)$ à $\mathcal{E}_I(kT_e)$.
- Justifier la présence du limiteur s'appliquant à la valeur de $N_{ic}(z)$. Donner un exemple montrant l'intérêt de ce limiteur. Calculer la valeur limite de N_{ic} , sachant que le courant moteur ne doit pas excéder 5,1 A.
- Exprimer et calculer K_{ci} permettant d'harmoniser les formats numériques des nombres entiers $N_{PWM}(kT_e)$ (codé sur 8 bits) et $\mathcal{E}_I(kT_e)$.
- Sachant que $N_c(z)$ est toujours positif, donner une relation liant $N_{cg}(z)$ du moteur gauche à $N_{cd}(z)$ du moteur droit en fonction des contenus des mots MODBUS 0x0011 et 0x0012. On veillera à mettre à l'échelle les consignes en s'aidant d'un facteur multiplicateur. Répertorier la destination des mots $N_{PWM}(kT_e)$ correspondant à chaque axe en fonction des sens de rotation imposés par la relation liant les mots MODBUS 0x0011 et 0x0012.

Etude de la structure logicielle de la carte

Le calculateur embarqué sur la carte est un ATMEGA 88 de la société Atmel.

C.2.1 Mesure de la vitesse

Nous rappelons que l'acquisition de la vitesse se fait par l'intermédiaire d'un codeur incrémental, 1024 points par tour, sur l'axe moteur qui fournit deux signaux carrés en quadrature. Nous allons utiliser les deux signaux pour élaborer deux vitesses qui seront ensuite comparées pour éliminer l'aléa de mesure engendré par les vibrations du robot autour de sa position d'équilibre sur le front de détection du codeur.

Q30. On met en œuvre deux compteurs d'impulsions. Préciser la stratégie d'élaboration de la vitesse (en radian par seconde), celle-ci devant être stockée dans un mot de 16 bits et offrir une résolution de 0,1 radian par seconde (nota: la vitesse angulaire maximale du moteur est de 314 rad/s).

- a) Deux stratégies d'acquisition sont possibles (scrutation ou interruption), justifier le fait que l'acquisition par interruption est la mieux adaptée dans le cas de ce système, en précisant les critères.
- b) En utilisant l'extrait de documentation du microcontrôleur, déterminer les valeurs d'initialisation des registres pour que les interruptions puissent être générées (il est rappelé que les deux codeurs sont branchés respectivement sur les lignes 27 (PCINT12) pour AXE1-XA, 28 (PCINT13) pour AXE1-XB, 15 (PCINT4) pour AXE2-XB, 16 (PCINT3) pour AXE2-XA)
- c) Produire sous forma algorithmique la routine de gestion des interruptions.
- d) Fournir l'algorithme du programme d'élaboration de la vitesse.

C.2.2 Mesure du courant

Les mesures de courant IAXE1 et IAXE2 des deux ponts sont câblées respectivement sur les entrées 23 (ADC 0) et 24 (ADC1) du microcontrôleur.

Les données "mesure de courant à fournir" au logiciel de correction doivent être codées sur 16 bits avec une précision de 10^{-2} A.

Q31.

- a) Préciser le canal utilisé pour effectuer cette conversion à l'aide du schéma de la carte.
- b) En utilisant l'extrait de documentation du microcontrôleur, identifier les registres et proposer les valeurs d'initialisation à y placer pour effectuer la conversion.
- c) Déterminer l'instant de fin de conversion pour vérifier que le bit d'état est bien positionné.
- d) Fournir l'algorithme de traitement de cette acquisition.

C.2.3 Implémentation des correcteurs

Q32. Suite à la présentation de l'asservissement développé précédemment

- a) Définir les structures de données nécessaires à l'implémentation de chaque correcteur.
- b) Ecrire l'algorithme permettant d'implémenter sous forme de procédure chacun de ces correcteurs.
- c) Ecrire l'algorithme général permettant de piloter un axe moteur à partir de la consigne Nc.
- d) Vérifier par une méthode de traçage le bon fonctionnement de ces algorithmes.

Exploitation pédagogique

Présentation de la commande MLI en STI génie électronique

Il s'agit de proposer l'étude du principe de la commande MLI et la structure d'un pont en H pour la commande en vitesse d'un moteur à courant continu dans les deux sens de rotation. On cherche également à montrer l'utilité de la mesure du courant moteur afin de détecter et d'indiquer une surcharge en couple.

Q33. Définition des séquences et documents pédagogiques

- a) Proposer une structure de séquence pédagogique permettant d'aborder les concepts mis en œuvre sur la carte variateur pour le pilotage de la vitesse moteur au niveau choisi (on ne s'intéresse pas à l'aspect asservissement).
- b) Produire un schéma fonctionnel de degré 1 de la carte variateur dans la configuration de l'acteur locomotion.

Q34. Développement d'une activité pratique

- a) Proposer une mise en œuvre matérielle destinée à mettre en évidence le principe de la commande MLI pour la commande en vitesse d'une MCC. Mettre en évidence les objectifs des mesures envisagées.
- b) Expliciter le positionnement de cette activité dans la séquence proposée précédemment ainsi que les objectifs pédagogiques visés.

Attentes du jury :

On attend une production maximale de 4 pages format A4.

Critères d'évaluation du candidat :

L'exactitude technique des documents présentés et le respect du système proposé,
La pertinence pédagogique des objectifs définis,
Le respect des exigences du référentiel,
La cohérence et la pertinence pédagogique des représentations utilisées au niveau choisi,
La qualité des descriptions et des explications proposées (exactitude technique, précision et concision, expression écrite, adéquation par rapport au contexte).

Implémentation et test d'une carte de variation de vitesse en STS Systèmes Electroniques

On envisage d'exploiter pédagogiquement le système et le sous-système associés à la carte de variation de vitesse dans une section de STS Systèmes Electroniques en développant le champ d'application « **Automatique et robotique** ». On cherche à amener les étudiants à tester et valider les performances des éléments logiciels et matériels de l'électronique de contrôle du module, à partir du bus de communication, jusqu'aux performances dynamiques de l'asservissement.

On cherche à développer les compétences terminales suivantes :

- T2 : établir les procédures de test sur une maquette.
- M3 : détecter le (ou les) composants ou le (ou les) constituants défectueux.

Q35. Définition de la configuration matérielle

- a) Définir et proposer une configuration pédagogique matérielle permettant de tester et valider les performances de la carte.
- b) Définir la méthodologie envisagée pour réaliser les tests de l'asservissement de vitesse.

Q36. Production des documents pédagogiques

- a) Proposer un document pédagogique précisant aux étudiants les étapes de tests et les critères de validation du fonctionnement de la carte.
- b) Elaborer une stratégie pédagogique permettant d'amener les étudiants à proposer une configuration industrielle de test de la carte.

Critères d'évaluation du candidat :

La pertinence des solutions matérielles envisagées,

La cohérence des stratégies pédagogiques développées,

Le respect des exigences du référentiel,

La qualité des descriptions et des explications proposées (exactitude technique, précision et concision, expression écrite, adéquation par rapport au contexte).

Sommaire du sujet

SUJET	212
A MODELISATION ET ANALYSE DU FONCTIONNEMENT.....	212
A.1 Analyse du système	212
A.2 Le sous système robot	213
A.3 Le sous-système Valise	215
A.4 Un contexte temps réel.....	217
A.5 Exploitation pédagogique	218
B ANALYSE DE LA TRANSMISSION DES DONNEES.....	220
B.1 Etude du principe de modulation du MODEM.....	220
B.2 Etude du modulateur intégré	225
B.3 Etude du récepteur intégré.....	235
B.4 Exploitation pédagogique	238
C ANALYSE ET IMPLÉMENTATION DE L'ACTEUR LOCOMOTION.....	240
C.1 Etude de la structure matérielle de la carte.....	240
C.1.1 Etude de l'alimentation des moteurs.....	240
C.1.2 Mesure et conversion du courant moteur	243
C.1.3 Présentation de l'asservissement	245
C.2 Etude de la structure logicielle de la carte	250
C.2.1 Mesure de la vitesse	250
C.2.2 Mesure du courant	251
C.2.3 Implémentation des correcteurs	251
C.3 Exploitation pédagogique	253
C.3.1 Présentation de la commande MLI en STI génie électronique.....	253
C.3.2 Implémentation et test d'une carte de variation de vitesse en STS Systèmes Electroniques	
256	

SUJET

A MODELISATION ET ANALYSE DU FONCTIONNEMENT

A.1 Analyse du système

L'approche de l'architecture logicielle du robot fait apparaître des diagrammes modèles écrits en langage UML (Unified Modeling Language) qui sont utilisés en particulier dans la description de projets sur la base d'une programmation objet. Certains modèles décrivent la structure statique du système étudié, d'autres la structure dynamique.

Q1. Généralités sur la modélisation

- a) **Citez les différents diagrammes utilisés dans le langage UML en précisant à quelle catégorie ils appartiennent et quel est leur rôle respectif.**

/...*/ note de l'auteur sur la sémantique de la question*

/ La réponse à cette question, doit faire abstraction du système présenté */*

Vues statiques du système:

Diagramme des cas d'utilisation : montre la nature des interactions entre le système et son environnement

Diagrammes d'objets : montrent des objets (instances de classes dans un état particulier) et des liens (relations sémantiques) entre ces objets

Diagrammes de classes : montrent les classes et les associations entre les classes du système

Diagrammes de composants : permettent de décrire l'architecture physique et statique d'une application

Diagrammes de déploiement : montrent la disposition physique des matériels qui composent le système et la répartition des composants sur ces matériels.

Vues dynamiques du système :

Diagrammes de collaboration : montrent des interactions entre objets (instances de classes et acteurs)

Diagrammes de séquence : permettent de représenter des collaborations entre objets selon un point de vue temporel, on y met l'accent sur la chronologie des envois de messages

Diagrammes d'état transition : permettent de décrire les changements d'états d'un objet ou d'un composant

Diagrammes d'activités : montrent le comportement d'une méthode ou le déroulement d'un cas d'utilisation

L'enrichissement du modèle se fait par une approche progressive de la solution tout en maintenant une structure logicielle opérationnelle.

- b) **Dans ces conditions comment qualifiez vous la méthode à mettre en œuvre pour réaliser complètement le projet ?**

La méthode est une méthode dite de prototypage

- itérative et incrémentale,
- guidée par les besoins des utilisateurs du système,
- centrée sur l'architecture logicielle.

- c) **Quelle stratégie de test allez-vous développer pour vérifier la conformité de votre système ?**

Cette méthode permet de déployer une structure fonctionnelle dès le premier incrément dans laquelle on peut déjà vérifier la validité globale (conformité au cahier des charges) du système, toutes les parties non implémentées peuvent être simulées et les futurs incréments remplaceront, au fur à mesure de la réalisation et après test unitaire, les différents simulateurs.

A.2 Le sous système robot

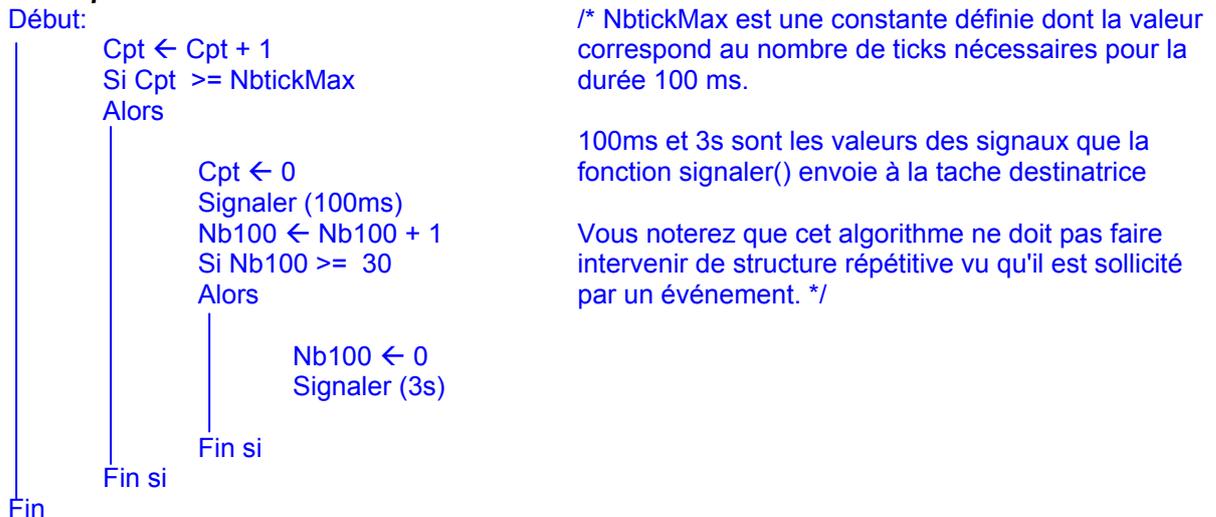


On souhaite compléter le modèle du robot tel qu'il est décrit dans la présentation afin de préciser certaines fonctionnalités.

Un détour s'impose par la classe IT dont le rôle est d'envoyer un événement toutes les 100 ms et les 3 s et de gérer des chiens de garde. Pour ce faire elle reçoit un événement appelé Tick, fourni par un composant spécialisé.

Q2. Description des méthodes de gestion du temps

- a) **Donnez les algorithmes des méthodes 100ms() et 3s() permettant d'envoyer les évènements correspondants.**



- b) **Comment doit être évaluée la valeur du tick ?**

Tick étant un événement, il n'a aucune valeur. Ce qui nous intéresse c'est la fréquence de son occurrence. Bien évidemment l'occurrence de Tick doit être un sous multiple de ou à la limite égal à 100 ms.

Il reste à vérifier que l'horloge du système et la gestion des timers intégrés au système permettent de réaliser ce délai ou un sous multiple de ce délai

- c) **Décrivez par un algorithme la gestion d'un chien de garde, en précisant son rôle, ses paramètres et les signaux nécessaires à son utilisation.**

Comme l'algorithme précédent le chien de garde quand il est activé est sollicité par la base de temps du système (Tick). Son activation nécessite que soit rempli un compteur avec le nombre (Cpt) de bases de temps au bout duquel l'événement de fin de délai doit être signalé.

La désactivation du chien de garde est une action de masquage de la routine du chien de garde.

Le chien de garde peut-être décrit de la manière suivante:



/* Beaucoup considèrent que l'occurrence de fin de délai se traduit par un reset total de l'application, c'est faire fi du fait qu'une application s'appuie généralement sur un système d'exploitation temps réel dans lequel un mécanisme de communication inter tâche est implémenté. Les chiens de garde sont généralement associés à la surveillance du temps de réponse des entrées sorties et permettent de détecter non des erreurs de la partie commande mais plutôt de l'application. Si le chien de garde se limitait à redémarrer un plantage total du système il serait intéressant d'expliquer comment un système planté peut redémarrer sachant que le mécanisme de génération de base de temps est lui même hors service. Et si le mécanisme de chien de garde était implémenté sur une structure matérielle indépendante de l'unité

centrale (technique généralement conseillée) un reset montrerait à l'évidence la piètre qualité de l'application */

d) Décrivez la méthode trame().

La méthode trame() se résume simplement à l'envoi du signal "trame rv dispo" lorsque l'interruption d'occurrence de trame arrive

/* n'oublions pas que nous sommes dans la classe it dont la spécialité est de gérer les sources d'interruption */

e) Quel est le rôle de l'attribut CPT ? Définissez son format.

L'attribut cpt est un compteur d'évènements temporels qui doit être un entier dont la taille dépend de la périodicité relative l'évènement temporel et de l'évènement à générer.

Suivant l'instanciation il peut servir pour le chien de garde ou la génération d'évènements périodiques.

Nous avons vu que la classe TC a pour rôle de gérer la trame TramTCrv reçue de la valise.

Cette méthode permet d'extraire les données TCrv qui vont être partagées en autant de structures TCrut. Ces données, encapsulées dans des trames TramTCrut, permettent d'assurer le pilotage de chacune des unités de traitement.

Q3. Description des attributs de la classe TC

/* Nous disposons de quatre attributs, deux sont de nature trame et exclusivement réservés au mécanisme de communication, deux sont de nature table de travail qui contiennent les données spécifiques à l'application. L'approche de la réponse se fait par la description fournie dans le paragraphe 2.1.1 de la description générale pour « tram TC rv » dont on déduira « TC rv » et dans l'annexe E1 pour « TC rut » dont on déduira « tram TC rut » */

a) Décrivez et donnez les déclarations avant algorithme des structures de données des différents attributs de la classe TC.

Tram TC rv est une structure de table de 10 octets « 2 pour l'entête (adresse cible + fonction) 6 pour l'application et 2 pour le CRC »

TC rv pour sa part, est aussi une table qui ne contient plus que 3 mots de 2 octets

b) Vous donnerez très précisément le nombre et le contenu de chacun des attributs TCrut.

TC rut est une table de 12 mots de 2 octets

Tram TC rut sera une table de 28 octets « 2 pour l'entête (adresse cible + fonction) 24 pour l'application et 2 pour le CRC »

/* pour des raisons d'homogénéité en terme de transmission nous utiliserons une trame standard à destination de toutes les cartes, chaque carte prélevant dans la structure reçue les données qui lui sont nécessaires */

Concentrons nous maintenant sur la méthode Modbus. A partir des documents fournis en annexe, vous vous intéresserez à la notion de fonctionnement en maître esclave et au rôle du contrôle de CRC des trames.

Q4. Le protocole Modbus

c) Donnez le principe du fonctionnement d'une communication réseau en Maître/Esclave.

Le principe d'un protocole maître esclave est que le support de communication ne peut être utilisé par une station esclave que si la station maîtresse lui en donne explicitement l'autorisation.

d) Quels sont les intérêts et les inconvénients de ce type de fonctionnement ?

Intérêt: déterminisme temporel puisqu'on connaît la durée du cycle de scrutation des esclaves

Inconvénient: une scrutation périodique de tous les esclaves, même ceux pour qui le besoin de communication n'est pas avéré, ce qui nuit à la réactivité du système.

/* l'inconvénient concernant la communication inter esclave ne peut être avancé ici car dans une topologie en BUS toutes les stations reçoivent toutes les trames transmises. Il ne faut pas confondre transport de données et arbitrage d'accès au medium */

- e) **Qu'apporterait l'utilisation d'un protocole probabiliste dans notre cas et quel en serait son inconvénient principal ?**

On améliorerait grandement la réactivité du système car le besoin de communication pourrait être immédiatement satisfait avec le risque majeur qu'une forte demande de communication entraîne des temps prohibitifs liés à la résolution de conflits (collisions) avec dans tout les cas perte du déterminisme temporel.

Q5. Le contrôle de CRC

- f) **A quoi sert un contrôle de CRC dans une trame réseau ?**

Le contrôle de CRC sert à vérifier l'intégrité de la trame reçue.

- g) **Précisez le principe de son utilisation.**

Le principe consiste à élaborer une signature avec tous les éléments contenus dans la trame et d'adjoindre cette signature à la trame pour en faire une trame signée qui sera transmise.

La trame signée reçue par le destinataire sera partagée entre trame et signature, une nouvelle élaboration de signature sera faite sur la trame et elle sera comparée à la signature transmise. En cas d'inadéquation entre signature élaborée et signature reçue la trame sera refusée par le destinataire ou dans la mesure où c'est possible corrigée par le destinataire (ceci n'est possible que dans le cas où il n'y a qu'une seule erreur dans la trame).

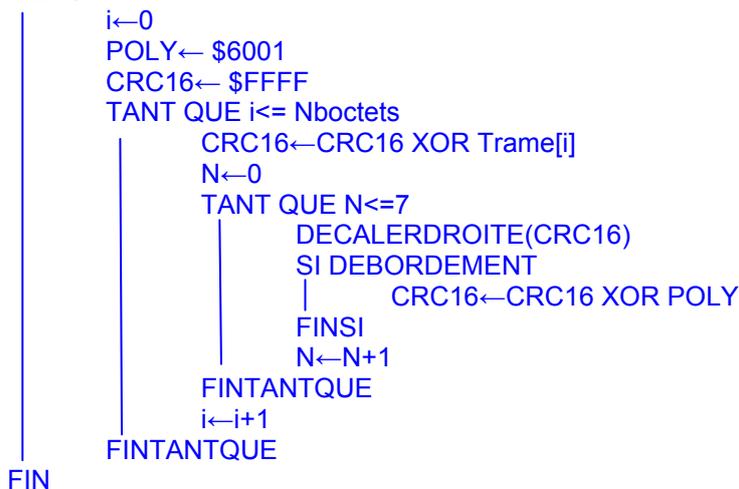
- h) **Donnez en langage formel de type algorithmique la méthode permettant d'évaluer le CRC d'une trame Modbus dont le principe est fourni en annexe.**

Donnée en entrée : Trame [Nboctets]

Donnée en sortie : Valeur sur 16 bits de CRC16

EVALLCRC(Trame, CRC16)

DEBUT



A.3 Le sous-système Valise

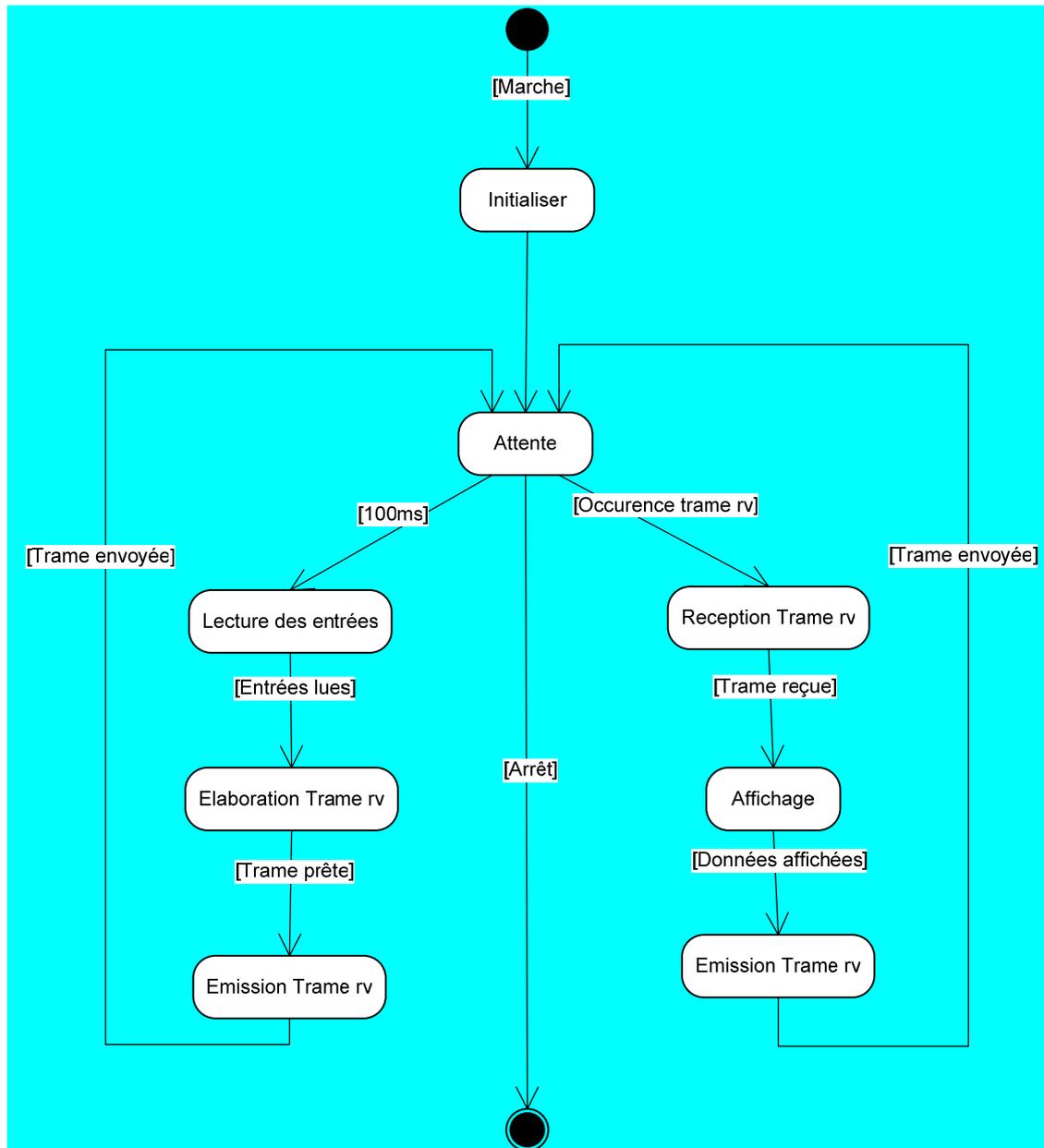


Q6. Analyse de la valise

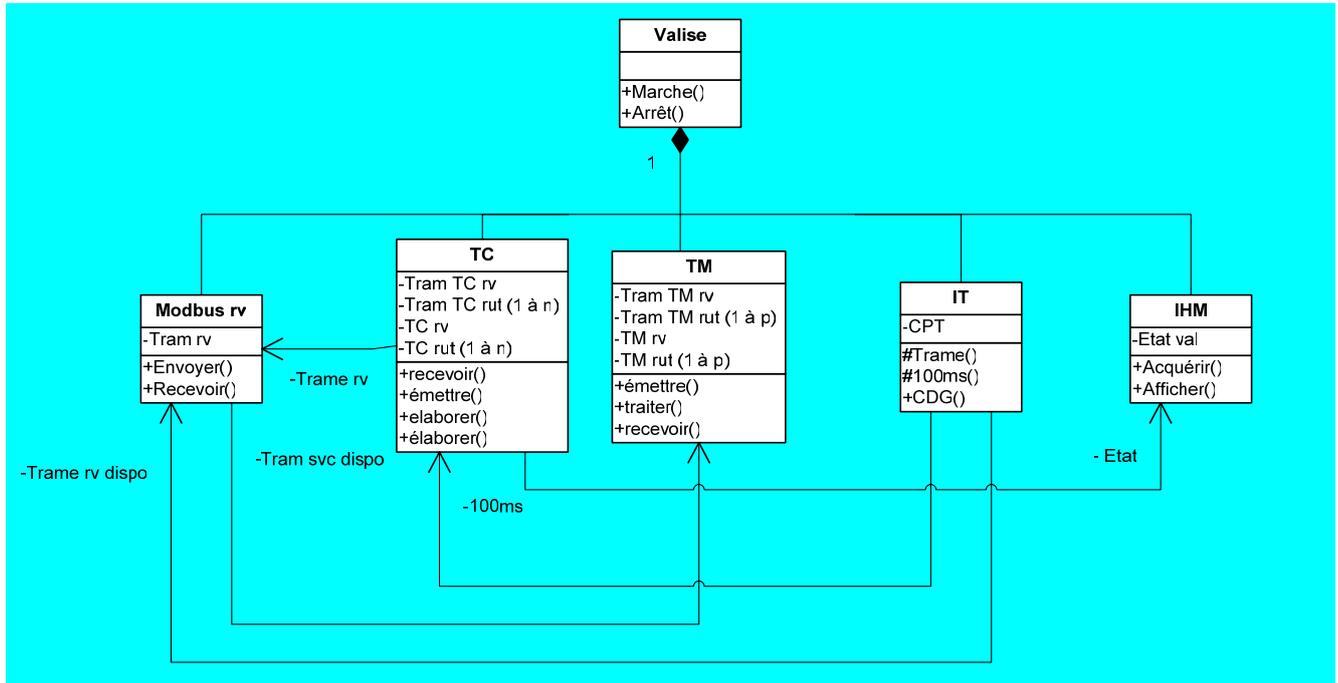
Pour ce sous-système dont le diagramme de contexte est fourni dans la présentation et en vous aidant de la description du sous système robot :

/ Les variantes par rapport au logiciel étudié du robot sont liés au fait que le logiciel de la valise gère l'interface homme machine (entrées TOR , sorties TOR, et entrées analogiques), et non le dialogue avec les RUT. Pour ce qui concerne le dialogue RV il est pratiquement équivalent du point de vue modèle.*

i) Etablir le diagramme état/transition spécifiant le comportement de la classe générique valise.



j) Etablir le diagramme des classes du logiciel de gestion de la Valise.



A.4 Un contexte temps réel

L'analyse du logiciel du robot fait apparaître dans le diagramme état/transition qu'il peut y avoir parallélisme de fonctionnement donc concurrence entre deux séquences initiées d'une part par l'état "Traitement/Elaboration Trame rut" d'autre part par l'état "Réception Trame rv".

Q7. Nous nous trouvons face à un problème de gestion multitâche concurrente qui ne peut être traité de manière triviale.

k) **Comment envisagez-vous de traiter un tel problème ? Indiquer les critères de choix permettant de gérer ce problème.**

La problématique principale dans un contexte multitâche c'est celui de la hiérarchisation, c'est à dire définir la priorité entre les tâches .

Les critères sont liés au fait qu'il faut comparer l'importance de plusieurs choses

l) **Déterminer quels vont être les états qui pourront être mis en séquence dans une même unité d'exécution (Tâche ou Thread).**

Il faut comparer l'importance de trois séquences :

Le "Traitement/Elaboration Trame rut" , "Emission Trame rut"

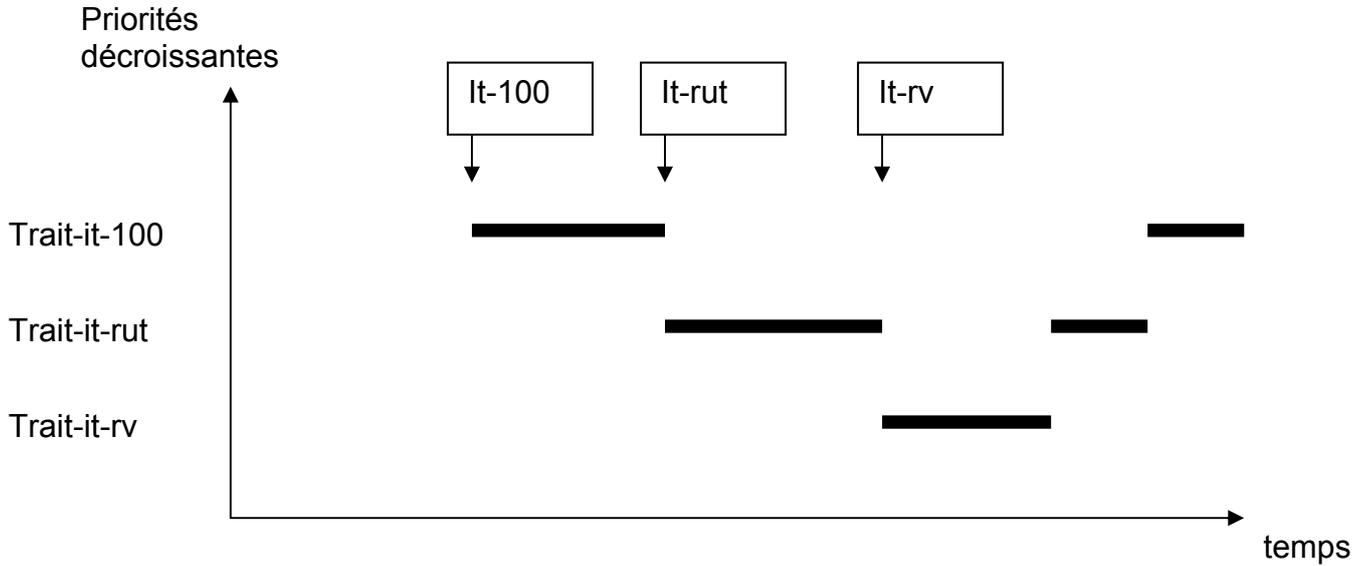
La "Réception Trame rv", "Traitement/Elaboration Trame rv", "Emission Trame rv"

l'arrivée d'une trame d'acquiescement rut, "Réception Trame rv".

m) **Déterminer les priorités respectives de chacune des unités d'exécution.**

Il paraît évident que le dialogue robot valise doit être privilégié, puis l'envoi périodique des informations rut, l'acquiescement rut sera traité en dernier lieu

- n) Donner le chronogramme d'exécution de chacune de ces unités.
- o) Qu'attendez-vous du mécanisme de séquençage des unités d'exécution ?



A.5 Exploitation pédagogique

Elaboration des documents de présentation d'un système

Il est envisagé d'exploiter ce système afin d'illustrer les concepts mis en jeu dans les unités d'entrées sorties d'une part, dans la transmission des données d'autre part. Dans cette partie, il est demandé au candidat de préparer l'analyse du sous-système Valise et de prévoir les documents de présentation associés. Le public sera choisi dans des sections de STS IRIS. Ces documents pourraient être utilisés lors de différentes séquences d'enseignement.

Q8. A partir du diagramme de contexte fourni dans la présentation, faire la mise en situation générale (c'est-à-dire restreindre et délimiter le système étudié pour illustrer un ensemble de concepts, définir le système dans son contexte).

/ Il est absolument indispensable à ce niveau de faire abstraction du Robot et de ne le considérer que comme un simple acteur extérieur au système qui reçoit et produit des trames. */*

Q9. Élaborer les principaux schémas de présentation associés (schémas fonctionnels, schéma d'architecture matérielle, diagrammes UML, algorithmes, etc.).

/ Le travail abordé à la question Q7 devait considérablement aider à cerner les points essentiels du modèle qui aurait dû être complété par des diagrammes de séquence, concernant la problématique des Entrées/sorties à destination de l'utilisateur */*

Q10. Expliciter les caractéristiques principales retenues pour encadrer le travail des élèves (caractéristiques fonctionnelles, matérielles ou comportementales, liées au système étudié).

/ S'ouvriraient plusieurs pistes d'études pour les élèves, les Entrées TOR, Les Sorties TOR, les Entrées analogiques, L'affichage de la Télémétrie, La communication CAN sur medium hertzien (déjà largement abordée dans le sujet)*

*Cette préparation doit se faire dans le cadre du référentiel de la section concernée et doit être positionnée dans la progression d'une telle section. */*

Attentes du jury

Pour les documents de présentation réclamés, on attend une production maximale de 4 pages format A4.

Critères d'évaluation du candidat :

- L'exactitude technique des documents présentés et le respect du système proposé,
- La pertinence pédagogique de la mise en situation choisie et des caractéristiques principales retenues,
- La cohérence et la pertinence pédagogique des représentations utilisées au niveau choisi,
- La pertinence des choix des travaux proposés et des résultats attendus des élèves,
- La qualité des descriptions et des explications proposées (exactitude technique, précision et concision, expression écrite, adéquation par rapport au contexte).

B ANALYSE DE LA TRANSMISSION DES DONNEES

B.1 Etude du principe de modulation du MODEM

On souhaite étudier le principe de modulation et de codage des données binaires afin de caractériser les contraintes à prendre en compte pour la reconstruction du message par le récepteur.

On rappelle que les échanges de données numériques entre la Valise et le Robot se font en half-duplex.

On note $m(t)$ le signal binaire modulant (signal informatif à transmettre).

Hypothèses simplificatrices :

- Dans la suite, sauf indication contraire, on suppose les transitions de fréquence instantanées lors d'un changement d'état logique du signal modulant (on néglige notamment le temps de réponse et les régimes transitoires du synthétiseur de fréquence).
- On considère que l'amplitude du signal $m(t)$ a la valeur unité ($M_{\max} = 1 \text{ V}$) lorsque le bit à transmettre est un 1 logique et une amplitude nulle lorsque le bit à transmettre est un 0 logique.

Q11. Généralités

- a) *Identifier les fonctions principales de l'unité mobile impliquées directement dans l'échange de données numériques par voie hertzienne.*

FP1 et FP2.

- b) *Rappeler les contraintes temporelles associées à une transmission HALF-DUPLEX.*

Une émission et une réception ne peuvent avoir lieu simultanément, ainsi, à un instant donné, soit le système est en réception, soit il est en émission.

A la mise en service, puis lors du fonctionnement du système, il faut établir un état « repos », puis une séquence de changement de mode (établie par un protocole) pour rendre des échanges de données possibles. L'un des appareils étant par défaut en mode réception, l'autre appareil étant en émission.

c) Identifier le modulateur / démodulateur intégré chargé de la transmission HF.

Il s'agit de l'AT86RF211

d) Compléter le tableau du document réponse DR1, en indiquant pour chaque signal de l'interface numérique du CI concerné, son rôle, sa direction, puis indiquer la fonction des différents bus associés.

Nom du signal	Rôle du signal	Direction entrée/sortie	Rôle du bus associé
DATAMSG	Les données démodulées	Bidirectionnel (entrée si émission ou sortie si réception)	Lecture / écriture des données à émettre ou reçues par voie radio
DATACLK	Signal d'horloge, permettant de synchroniser de decoder les données reçues	sortie	
SLE	Sélection boitier	entrée	BUS de configuration synchrone
SCK	Horloge de synchronisation des échanges	entrée	
SDATA	Données à lire ou à écrire	Entrée/sortie	

Q12. Expression du signal modulé

L'expression de la porteuse est : $V_p(t) = V_{max} \cdot \sin(2\pi \cdot f_0 \cdot t + \varphi_0)$.

a) Donner l'expression générale du signal $V_m(t)$ modulé en fréquence par un signal $m(t)$ faisant apparaître le terme Δf où,

$\Delta f = f_1 - f_0$ où f_1 est la fréquence associée à $m(t)=1$ et f_0 , la fréquence associée à $m(t)=0$.

$$V_m(t) = V_{max} \cdot \sin(2\pi \cdot f_0 \cdot t + 2\pi \cdot K \cdot \int m(t) \cdot dt + \varphi_0)$$

Avec K : taux de modulation

Ici $m(t)$ ne peut prendre que deux valeurs (0 ou 1), auxquels sont associés deux fréquences, fixant ainsi la valeur de K : $K = \Delta f$

On peut donc écrire :

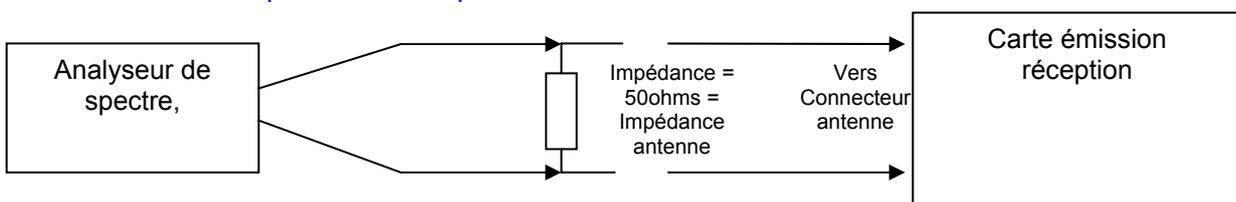
$$V_m(t) = V_{max} \cdot \sin(2\pi \cdot (f_0 + m(t) \cdot \Delta f) \cdot t + \varphi_0)$$

En utilisant la formule trigonométrique $\sin(a+b) = \sin a \cdot \cos b + \cos a \cdot \sin b$ on obtient une expression permettant de mettre en évidence les termes de fréquence variable et les termes de fréquence constante :

$$V_m(t) = V_{max} \cdot \sin(2\pi \cdot f_0 \cdot t + \varphi_0) \cdot \cos[2\pi \cdot m(t) \cdot \Delta f \cdot t] + V_{max} \cdot \cos(2\pi \cdot f_0 \cdot t + \varphi_0) \cdot \sin[2\pi \cdot m(t) \cdot \Delta f \cdot t]$$

b) Proposer une méthode de mesure permettant de relever le spectre COMPLET du signal modulé. Proposer un schéma en faisant apparaître les appareils utilisés et leur branchement sur la carte de l'émetteur. Quelle doit être la contrainte sur $m(t)$ pour visualiser ce spectre ?

Le signal $m(t)$ doit être considéré comme aléatoire, avec une succession de 0 et de 1 afin de ne pas avoir une seule fréquence sur le spectre :



On charge la sortie antenne par une impédance ayant la même valeur que celle de l'antenne, normalement positionnée, on vient placer la sonde HF de l'analyseur de spectre sur cette impédance (sonde HF afin de ne pas modifier l'impédance vue de la sortie), il faut un analyseur de spectre capable de mesurer les hautes fréquences (500MHz de bande passante par exemple...)

Dans tous les cas de figure, la mesure reste délicate.

Dans la suite $\varphi_0=0$.

Q13. Etude du codage de l'élément binaire utilisé pour le signal modulant

On note T_b le temps de transmission d'un bit fixant ainsi le rythme binaire du signal modulant.

Hypothèse simplificatrice : On suppose équiprobable l'apparition d'un 1 ou d'un 0 sur le signal modulant noté $m(t)$ (considéré comme un signal aléatoire à nombre d'états finis) pendant T_b , de plus, on suppose $m(t)$ stationnaire et ergodique d'ordre 2.

a) **Quelle est alors la relation liant la densité spectrale bilatérale d'énergie normalisée du signal $m(t)$, noté $G(f)$ à sa fonction d'auto-corrélation (ici égal à sa covariance) noté $\Phi_{mm}(\tau)$ (où τ représente le retard de corrélation $(-\infty < \tau < +\infty)$). Donner le nom de ce théorème.**

La relation de **Wiener-Kintchine** nous dit que la transformée de Fourier de la fonction d'auto corrélation (ou de la covariance d'un signal aléatoire ergodique et stationnaire d'ordre 2) est égale à la densité spectrale d'énergie de ce signal :

$$G(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_{mm}(\tau) \cdot e^{-j \cdot 2\pi \cdot f \cdot \tau} \cdot d\tau$$

b) **Donner la définition de la fonction d'auto corrélation de $\Phi_{mm}(\tau)$ en fonction de $m(t)$ et τ .**

On définit $P1(\tau)$ la probabilité que $m(t) \cdot m(t - \tau) = 1$ dans l'intervalle de temps $[t_0, t_0 + \tau]$, où t_0 représente l'origine de temps des réalisations de $m(t)$ (t_0 correspond donc toujours au début de la transmission d'un caractère).

On rappelle que la probabilité ($P0(\tau)$) d'avoir $m(t) \cdot m(t - \tau) = 0$ dans le même intervalle de temps est alors égale à $(1 - P1(\tau))$.

On peut montrer que la relation définissant la fonction d'auto corrélation $\Phi_{mm}(\tau)$ de $m(t)$ peut se mettre sous la forme $\Phi_{mm}(\tau) = P1(\tau)$ si l'on considère qu'aucune puissance n'est contenue dans le signal $m(t)$ lorsque $m(t)=0$.

$$\Phi_{mm}(\tau) = \frac{1}{T} \int_T m(t) \cdot m(t - \tau) \cdot dt$$

c) **Compléter le tableau du document réponse DR2 en explicitant la valeur de $P1(\tau)$ et de $\Phi_{mm}(\tau)$ pour les intervalles de temps indiqués.**

Intervalles de temps	$P1(\tau)=\Phi_{mm}(\tau)$
$t \in [t_0, t_0 + \tau]$ avec $ \tau > T_b$	1/4
$t \in [t_0, t_0 + \tau]$ avec $0 < \tau < T_b$	$\tau / (4T_b)$
$t \in [t_0 + \tau, t_0 + T_b]$ avec $0 < \tau < T_b$	$(T_b - \tau) / (2T_b)$

d) **Montrer que $\Phi_{mm}(\tau)$ peut se mettre sous la forme**

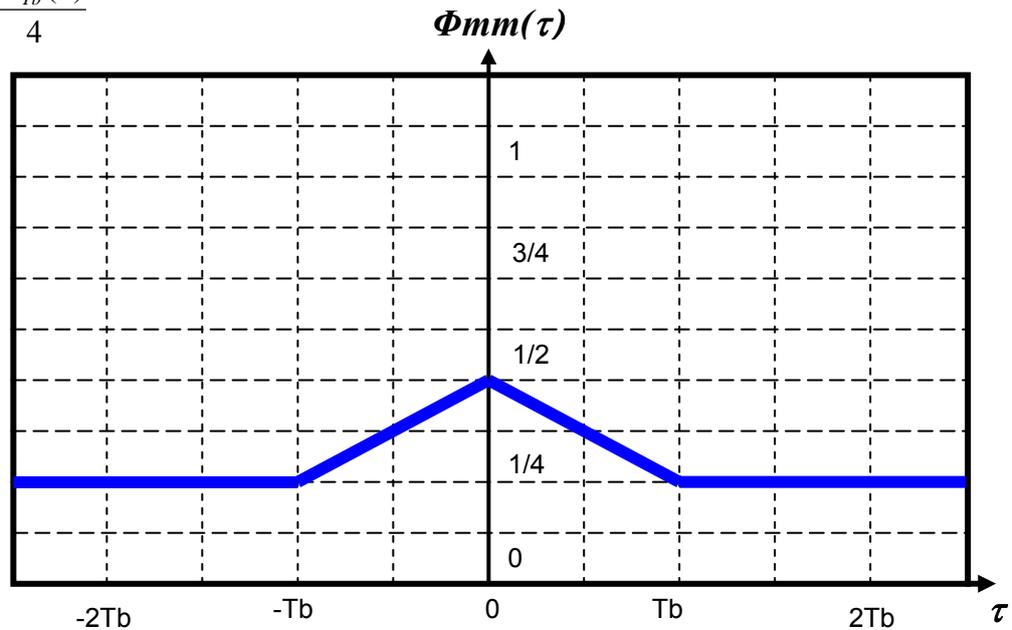
$$\Phi_{mm}(\tau) = \frac{1}{4} + \frac{\text{Tri}_{Tb}(\tau)}{4} = \frac{1}{4} + \frac{1}{4} \left(2 - \frac{\tau}{Tb} \right)$$

en fonction de τ et Tb pour toute la plage de variation de τ

$(-\infty < \tau < +\infty)$ puis tracer $\Phi_{mm}(\tau)$.

Pour toute la plage de variation, il suffit de faire la somme des cas précédent, en remarquant, que m étant réel, la fonction d'auto corrélation est paire. Ainsi, on peut donc écrire que

$$\Phi_{mm}(\tau) = \frac{1}{4} + \frac{\text{Tri}_{Tb}(\tau)}{4}$$

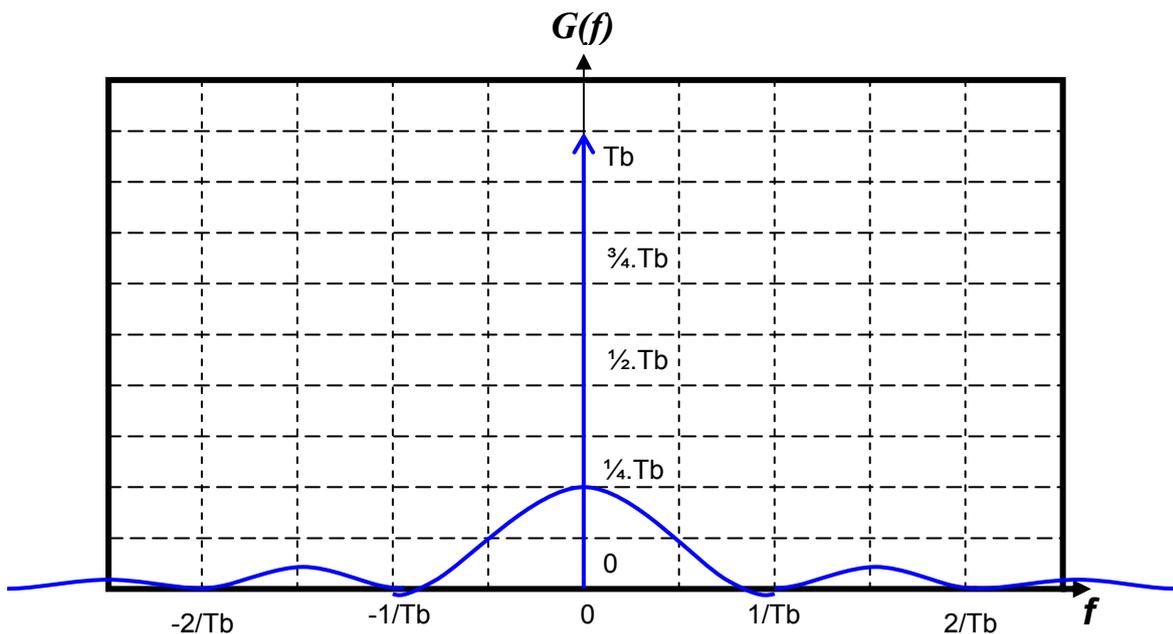


e) Exprimer $G(f)$ puis tracer cette fonction sur le document réponse DR3.

$$G(f) = (\text{TF}(\text{Rect}_{Tb/2}(\tau)) \times \text{TF}(\text{Rect}_{Tb/2}(\tau))) / 4Tb + \delta(f)/4$$

$$\text{TF}(\text{Rect}_{Tb/2}(\tau)) = Tb \text{ sinc}(\Pi.f.Tb)$$

$$G(f) = \delta(f)/4 + Tb.\text{sinc}^2(\Pi.f.Tb)/4$$



Q14. Analyse des résultats et conséquences de ce type de codage

On se place en sortie du démodulateur, où l'on se propose d'étudier les contraintes de décodage du signal $m(t)$.

- a) *A partir de la représentation graphique de $G(f)$, indiquer si il est possible d'isoler la fréquence associée au rythme binaire T_b par un simple filtrage fréquentiel. A partir de l'expression de $G(f)$, justifier ce résultat. Expliquer l'intérêt que peut présenter ce type d'opération.*

Il est impossible d'isoler la fréquence associée au rythme binaire T_b , car on peut voir sur le graphe que la densité spectrale d'énergie est nulle pour tous les multiples entiers des fréquences $1/T_b$, ceci implique qu'un filtrage passe bande (qui est une opération relativement simple à réaliser avec des structures électroniques classiques) de l'une de ces fréquences fournira une tension nulle.

Démonstration :

Si K_b est un entier quelconque différent de 0 :

$$\text{sinc}^2(\pi.K_b.T_b/T_b) = \text{sinc}^2(\pi.K_b) = 0.$$

L'intérêt de ce type d'opération est de permettre au récepteur de reconstruire le rythme binaire à partir du signal informatif, sans avoir recours à un autre moyen de synchronisation des données.

- b) *Déduire le paramètre commun, dépendant de T_b à fixer obligatoirement sur le récepteur et sur l'émetteur pour rendre la transmission de donnée cohérente.*

Afin de permettre au récepteur de délimiter les informations binaires dans le signal qu'il reçoit, il faut donc indiquer le débit binaire. Ce paramètre, exprimé en bauds ou en bits par secondes doit donc être indiqué au récepteur.

- c) *Montrer que le résultat précédent peut être également appliqué aux liaisons RS485 utilisés pour le réseau MODBUS RTU du robot.*

Le protocole MODBUS prévoit en effet pour son implémentation sur liaison série asynchrone (RS485), la configuration du débit binaire, qui doit être identique pour toutes les stations connectées au BUS. Un bit est en effet représenté par une différence de potentiel entre les deux lignes Tx+ et Tx-. Ce qui correspond à un codage NRZ, les mêmes contraintes s'appliquent donc.

- d) *Quel avantage offre le codage Manchester au regard du codage exploité dans ce système ? Quelle application directe de cet avantage est utilisée dans les réseaux Ethernet ? Justifier et donner un cas concret.*

Le code Manchester permet de différencier un 1 logique d'un zéro logique en s'aidant du type de front associés, par construction, à leurs motifs respectifs (fronts montant ou descendant), ainsi, ce front, présent pour chacun bit permet par filtrage passe bande de synchroniser une PLL sur le débit binaire afin d'aider le récepteur à décoder le message binaire.

Cet avantage, permet par exemple, aux stations connectées à un réseau Ethernet de se synchroniser automatiquement, par décalage séquentiel de la fréquence d'accord de la PLL destinée à reconstruire le débit binaire, sur le débit de la station émettrice d'une trame.

C'est pour cette raison que l'on peut connecter des périphériques Ethernet 10Mbits sur un réseau Ethernet 100Mbits ou Gigabits Ethernet.

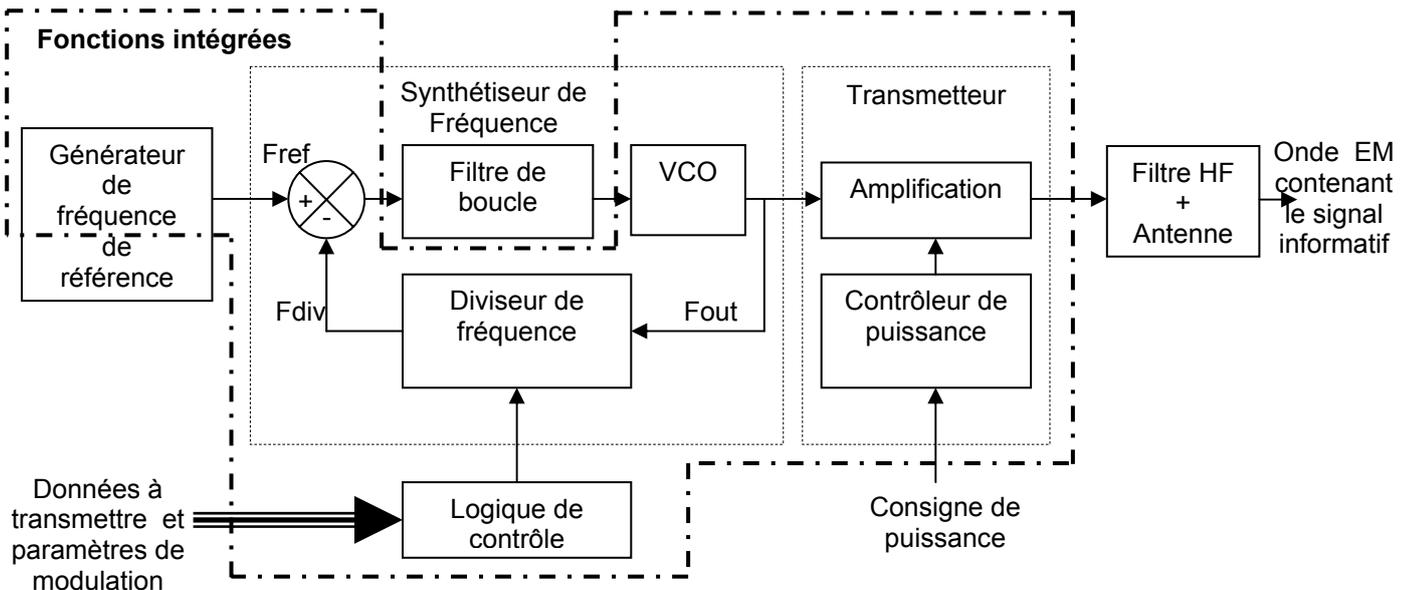
B.2 Etude du modulateur intégré

On s'intéresse au modulateur de fréquence intégré au circuit identifié précédemment.

Hypothèse simplificatrice : Sauf indication contraire, l'étude des différents éléments se fera autour du point de fonctionnement nominal, boucle verrouillée.

Q15. Etude de la structure du modulateur

Schéma bloc du modulateur de fréquence



a) **Quel est le rôle du synthétiseur de fréquence ? Rappeler le nom de la structure utilisée pour le réaliser, puis expliciter brièvement le rôle de chacune des fonctions qui le compose.**

Le synthétiseur de fréquence permet de produire à partir d'une unique fréquence de référence plusieurs autres fréquences.

La structure utilisée pour réaliser le synthétiseur étudié ici, est une boucle à verrouillage de phase (PLL).

L'architecture fonctionnelle de ce synthétiseur fait donc apparaître :

- **Un comparateur de phase, chargé de produire un signal informatif proportionnel à la différence de phase instantanée.**
- **Un filtre de boucle, chargé de piloter de manière optimale, au sens des asservissements, le VCO afin de conférer à la PLL le comportement souhaité.**
- **Un VCO, chargé de produire une fréquence variable en fonction de la tension fournie par le filtre de boucle. Le VCO peut produire des fréquences bien différentes de la fréquence de référence.**
- **Un diviseur de fréquence programmable, qui permet de produire un signal dont la fréquence de sortie soit proportionnelle à la fréquence de sortie du VCO. En modifiant la valeur du coefficient de proportionnalité, il est possible d'obtenir une stabilisation de la boucle de phase autour d'une fréquence qu'il est possible de choisir.**

Ce type de structure permet d'obtenir par simple changement de valeur de division une large plage de fréquences distinctes, à partir d'une unique fréquence de référence.

Par ailleurs la stabilité de chacune des fréquences synthétisées ne dépend pratiquement que de la précision de la fréquence de référence, permettant ainsi d'optimiser considérablement les performances de la PLL et de simplifier l'intégration et les problèmes de CEM en limitant les sources de fréquences.

- b) Pour quelle raison la donnée à transmettre a-t-elle une action sur le diviseur de fréquence ? Expliquer simplement le fonctionnement du modulateur de fréquence en faisant intervenir le signal modulant $m(t)$.

Pour produire un signal modulé en fréquence, il est donc, possible, grâce à la structure précédemment présentée, de faire varier la fréquence en modifiant le coefficient de division du diviseur de fréquence.

Ainsi, si le signal modulant $m(t)$ agit, sur la facteur de pré division de fréquence, on obtient bien un comportement de modulateur de fréquence. Ce constat est d'autant plus vrai que si $m(t)$ est un signal binaire, le nombre de facteur de division de fréquence possible, se limite à deux valeurs distinctes, l'une permettant d'obtenir la fréquence F_0 et l'autre la fréquence F_1 .

- c) Donner et expliquer la structure d'une trame destinée au paramétrage du Circuit intégré étudié ici en provenance du microcontrôleur. Expliciter le principe de transmission entre le microcontrôleur et le circuit étudié.

Une trame de paramétrage permet de modifier ou de lire le contenu de l'un des registres de paramétrage du RF211, Chaque registre est repéré par une adresse, l'adresse d'un registre est codée sur 4 bits,

Un bit R/W permet de distinguer une opération d'écriture d'une opération de lecture.

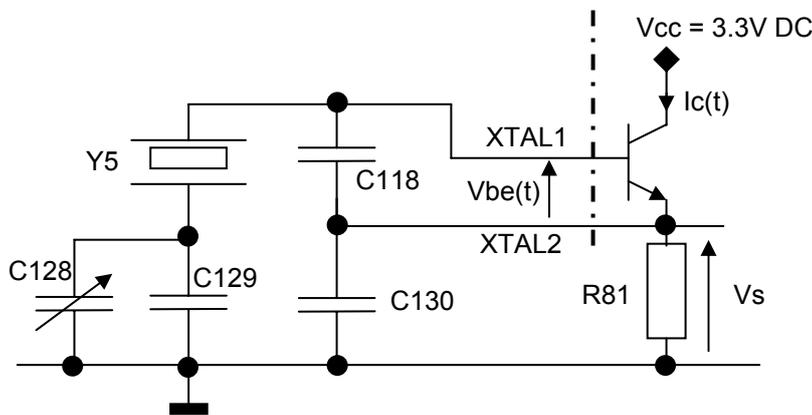
Le nombre de bits d'un registre peut varier, ainsi pour un registre donné, il faut transmettre le nombre de bit correspondant.

La transmission se fait comme indiqué précédemment en mode synchrone, le microcontrôleur étant maître du signal d'horloge de synchronisation.

(cf. annexes pour la structure de la trame)

Q16. Étude du générateur de fréquence de référence

On donne le schéma simplifié du générateur de fréquence de référence (les composants internes au CI utiles à la polarisation du transistor n'apparaissent pas) :



Correction du sujet d'électronique (agrégation Interne 2006)

Pour le point de polarisation choisi qui impose V_{be0} et I_s (courant de saturation du transistor), lorsque les oscillations existent à la fréquence f_0 on admet que la tension $V_{be}(t)$ peut s'écrire sous la forme :

$$V_{be}(t) = V_{be0} + V_1 \cdot \cos(\omega_0 \cdot t)$$

- a) *Montrer que la relation liant le courant collecteur (noté $I_c(t)$) à la tension $V_{be}(t)$ peut s'écrire sous la forme suivante en explicitant les différents termes. Préciser l'ordre de grandeur de V_T pour une température de 300 K. Justifier.*

$$I_c(t) = I_s \cdot \exp\left(\frac{V_{be0}}{V_T}\right) \cdot \exp\left(\frac{V_1 \cdot \cos(\omega_0 t)}{V_T}\right) = I_s \cdot \exp\left(\frac{V_{be0}}{V_T}\right) \cdot \sum_n a_n \cdot \cos(n\omega_0 t)$$

Il est admis que le comportement du courant collecteur d'un transistor bipolaire est lié à la tension Base – Emetteur par la relation suivante :

$I_c(t) = I_s \times \exp(V_{be}(t)/V_t)$ où :

V_{be} est la tension base – émetteur,

I_s est le courant de saturation de jonction,

V_t est la tension de jonction, qui dépend essentiellement pour un transistor donné, de la température de jonction, exprimée en ° Kelvin. V_t est classiquement de l'ordre de 25mV.

Ainsi, si $V_{be}(t) = V_{be0} + V_1 \cdot \cos(\omega_0 \cdot t)$

On peut écrire

$$\begin{aligned} I_c(t) &= I_s \times \exp(V_{be}(t)/V_t) = I_s \times \exp((V_{be0} + V_1 \cdot \cos(\omega_0 \cdot t)) / V_t) \\ &= I_s \times \exp(V_{be0} / V_t) \times \exp(V_1 \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) / V_t) \end{aligned}$$

Or, le terme variable $f(t) = \exp(V_1 \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) / V_t)$ est une fonction périodique du temps, qui peut être décomposé en séries de Fourier.

C'est une fonction paire (car $f(t) = f(-t)$), ainsi, seuls les termes en cosinus de la décomposition en séries de Fourier peuvent être non nuls.

Ainsi, on voit apparaître une suite de terme qui s'expriment avec des fonctions de Bessel.

Pour $n=0$:

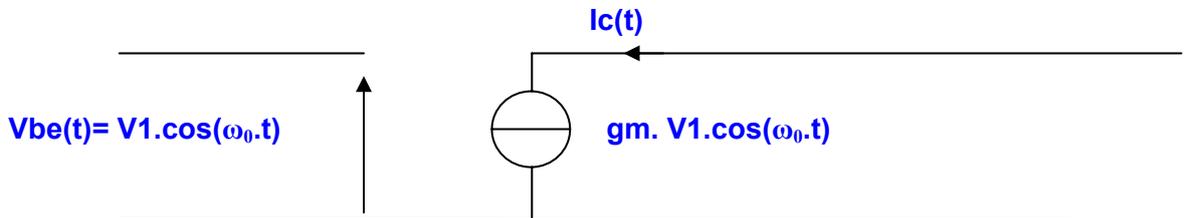
$$a_0(x) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{x \cdot \cos(\omega_0 \cdot t)} \cdot d\omega_0 t = I_0(x) \quad \text{Ce terme est constant !}$$

pour $n>0$, on a :

$$a_n(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} e^{x \cdot \cos(\omega_0 \cdot t)} \cdot \cos(n \cdot \omega_0 t) \cdot d\omega_0 t \quad \text{Ce terme fait apparaître des}$$

pulsations multiples de la pulsation ω_0 .

- b) *Etablir le schéma équivalent en petits signaux du transistor bipolaire (sans faire apparaître les impédances parasites) et montrer qualitativement que ce modèle peut alors être considéré comme un amplificateur à transconductance de facteur d'amplification noté g_m dans certaines conditions qu'il est demandé d'expliciter.*



On note que le terme V_{be0} est négligé en petits signaux, car il s'agit là d'une composante continu
Si le transistor est utilisé dans un circuit très sélectif pour la fréquence f_0 , alors, le transistor permet d'amplifier en courant le terme de fréquence fondamentale, cette amplification de transconductance peut alors être noté g_m , et est constant pour un point de polarisation et une température de fonctionnement donné.

En effet, les termes d'amplification faisant apparaître un multiple de f_0 sont fortement atténués, et peuvent apparaître négligeables. Autrement dit les non linéarités du transistor sont négligées.

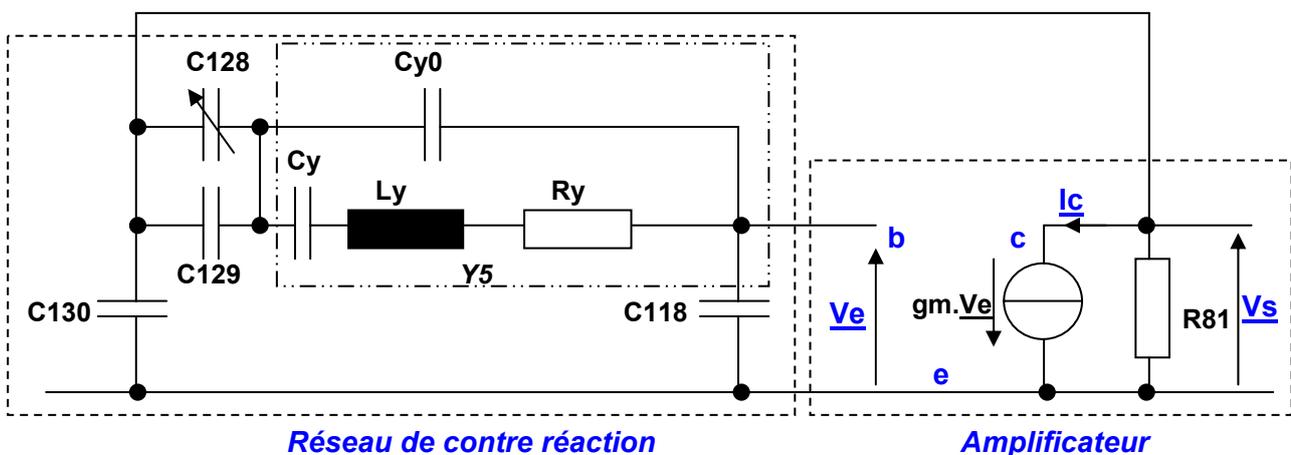
On constate que pour le schéma étudié, on est dans ce cas de figure, car le quartz se comporte comme un filtre passe bande sélectif à très grand coefficient de qualité.

Ainsi, le courant I_c est donc considéré comme proportionnel à V_1 pour la fréquence f_0 , ceci caractérise bien un amplificateur à transconductance de facteur g_m .

- c) *Donner le nom du type d'oscillateur utilisé ici. En utilisant le modèle du transistor qui vient d'être établi, donner le schéma équivalent de ce montage pour les petits signaux. Faire clairement apparaître le modèle équivalent du quartz).*

Il s'agit d'un oscillateur colpitts à transistor bipolaire monté en collecteur commun.

Schéma équivalent en petits signaux :



Où L_y , R_y et C_y constituent les éléments du modèle équivalent de la branche motionale du quartz, et C_0 la sa capacité parallèle.

- d) *Mettre en évidence la chaîne d'amplification ainsi que le réseau de contre-réaction.*

Dans la suite, on négligera les éléments modélisant les pertes du quartz.

Correction du sujet d'électronique (agrégation Interne 2006)

On donne les valeurs numériques des éléments de la branche série du quartz :

$L_y = 0,00804 \text{ H}$, $C_y = 30 \text{ fF}$.

Pour la branche parallèle : $C_{yp} = 8 \text{ pF}$

- e) *Quel est obligatoirement le type d'impédance du quartz pour que les oscillations existent ? Justifier votre réponse en exploitant les modèles équivalents des questions précédentes.*

On rappelle que pour un quadripôle en PI composé uniquement de composants réactifs (selfs ou capacités), il suffit d'écrire que la somme des réactances est nulle pour que la partie imaginaire de l'impédance équivalent d'entrée du quadripôle soit nulle (impédance vue par la sortie de l'amplificateur de l'oscillateur).

Le quartz doit présenter une impédance de type inductive. Ceci afin de pouvoir annuler la réactance du quadripôle en pi de contre réaction, qui ici n'est modélisé que par des capacités pures ! Cette réactance étant nulle pour une pulsation donnée, le circuit peut entrer en oscillation à condition que la condition d'amplification et de non linéarité sans mémoire de l'amplificateur soit remplie (non linéarité permettant de limiter le pompage)

- f) *Exprimer littéralement la fréquence d'oscillation en fonction des éléments du montage. Montrer que cette fréquence est réglable. Calculer numériquement les extrema de réglage de cette fréquence.*

Après avoir écrit que la somme des réactances est nulle puis après résolution de l'équation de type $a \cdot \omega_0^2 = b$, où ω_0 représente la pulsation de résonance, on obtient :

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{(C_y + C_{yp}) \cdot \{ (C_{118} + C_{130}) \cdot (C_{128} + C_{129}) + C_{118} C_{130} \} + C_{118} C_{130} \cdot (C_{128} + C_{129})}{L_y C_y \cdot \{ C_{yp} \cdot [(C_{118} + C_{130}) \cdot (C_{128} + C_{129}) + C_{118} C_{130}] + C_{118} C_{130} \cdot (C_{128} + C_{129}) \}}}$$

Pour $C_{128} = 6,5 \text{ pF}$ on obtient $\omega_0 = 64\,434\,793 \text{ rad/s} \Rightarrow f_0 = 10\,255\,115 \text{ Hz}$

Pour $C_{128} = 30 \text{ pF}$ on obtient $\omega_0 = 64\,424\,541 \text{ rad/s} \Rightarrow f_0 = 10\,253\,484 \text{ Hz}$

- g) *On souhaite régler manuellement la fréquence d'oscillation du montage à l'aide d'un oscilloscope. Proposer une méthode de réglage, faisant apparaître le mode opératoire, ainsi que l'ensemble des appareils de mesures utilisés. On veillera à exposer clairement les précautions à prendre pour effectuer cette opération. Proposer un schéma représentant le circuit de mesure.*

On prélève la tension aux bornes de R81, à l'aide d'un oscilloscope numérique ou un analyseur de spectre équipé de sondes HF avec une résistance interne élevée (>100 Mohms) et une très faible capacité parasite (<0,1 pF), afin de limiter l'effet de la mesure sur la fréquence d'oscillation.

Mode opératoire :

- 1) positionner le CI sur un support antistatique, si possible à l'abri des champs HF proches de f utilisés ou mesurées, Mise à la masse de la carte,
- 2) Décharge électrostatique des appareils, et CI
- 3) positionner appareils de mesure et sondes
- 4) mise sous tension appareils de mesure
- 5) Alimenter la carte, vérifier tension d'alimentations, et stabilisation de la tension
- 6) Attente de stabilisation de fréquence et mise en T°
- 7) Mesures
- 8) Réglages, calculs des tolérances de mesures, estimation des déviations engendrées par appareils de mesure
- 9) Compensation des réglages en accord avec calculs précédents.
- 10) Relevés et synthèse.

Q17. Étude du synthétiseur de fréquence

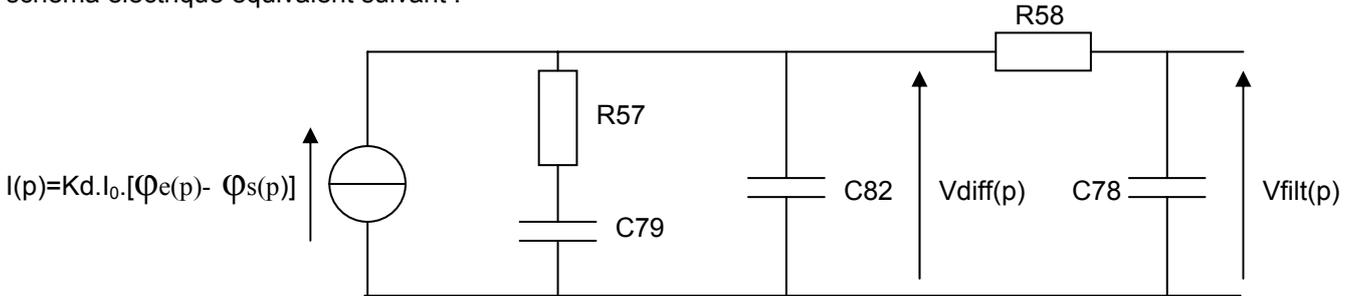
On cherche à évaluer le rythme binaire maximum du signal modulant en analysant la fonction de transfert du synthétiseur de fréquence.

Le comparateur de phase à pompe de charge est chargé par le filtre placé entre les broches 41 (FILT1) et 42 (VCON) (Par souci de clarté, le modèle du générateur de courant a été simplifié).

Le développement de Taylor de l'expression liant la fréquence en sortie du VCO (f_{OUTVCO}) à sa tension de commande (V_{VCO}) autour du point de fonctionnement est donné ci-dessous :

$$f_{OUTVCO} = f_{VCO0} + K_{VCO} \cdot V_{VCO} \quad \text{où } K_{VCO} = 2,67 \text{ MHz.V}^{-1}, f_{VCO0} = 433 \text{ MHz.}$$

On modélise, dans l'espace de Laplace, l'ensemble comparateur de phase – filtre de boucle avec le schéma électrique équivalent suivant :



Avec :

$$Kd.I_0 = 225 \cdot 10^{-6} \text{ A/rad,}$$

$\Phi_e(p)$: la phase instantanée du signal d'entrée,

$\Phi_s(p)$: la phase instantanée du signal de sortie de la boucle

$V_{filt}(p)$: la tension de sortie de l'ensemble comparateur de phase – filtre de boucle.

- a) Exprimer littéralement $V_{filt}(p)$ en fonction de $\Phi_e(p) - \Phi_s(p) = \Delta\Phi(p)$ et des éléments du montage puis donner la fonction de transfert correspondante sous forme canonique et numérique.**

$$T_{filt}(p) = \frac{V_{filt}(p)}{\varphi_e(p) - \varphi_s(p)} = \frac{kd \cdot I_0}{p \cdot (C_{79} + C_{82} + C_{78})} \times \frac{(1 + R_{57} \cdot C_{79} \cdot p)}{\left(1 + p \cdot \left(\frac{C_{78} \cdot R_{57} \cdot C_{79} + C_{78} \cdot R_{58} \cdot (C_{79} + C_{82}) + R_{57} \cdot C_{82} \cdot C_{79}}{C_{79} + C_{82} + C_{78}}\right)\right) + p^2 \cdot \left(\frac{C_{78} \cdot R_{58} \cdot R_{57} \cdot C_{82} \cdot C_{79}}{C_{79} + C_{82} + C_{78}}\right)}$$

On montre que la fonction de transfert précédente peut se mettre sous la forme :

$$T_{filt}(p) = \frac{V_{filt}(p)}{\varphi_e(p) - \varphi_s(p)} = \frac{k}{p} \times \frac{(1 + \tau_d \cdot p)}{(1 + \tau_1 \cdot p) \cdot (1 + \tau_2 \cdot p)}$$

On donne :

$$\tau_d \approx 18,48 \mu\text{s}$$

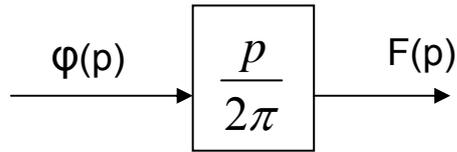
$$\tau_1 \approx 1,722 \mu\text{s}$$

$$\tau_2 \approx 394 \text{ ns}$$

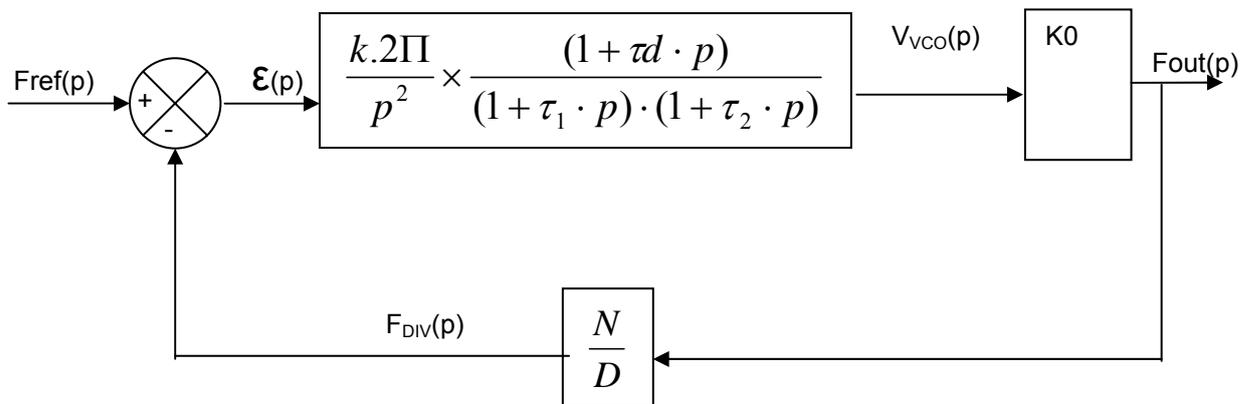
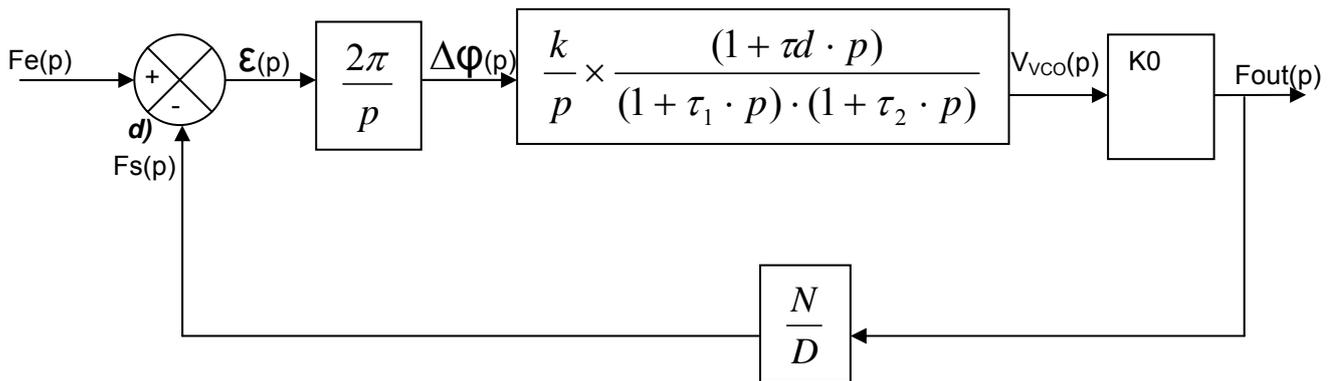
$$k \approx 36,437 \cdot 10^3 \text{ V/rad}$$

Sauf indication contraire, on prendra dans la suite le rapport N/D = 0,02366.

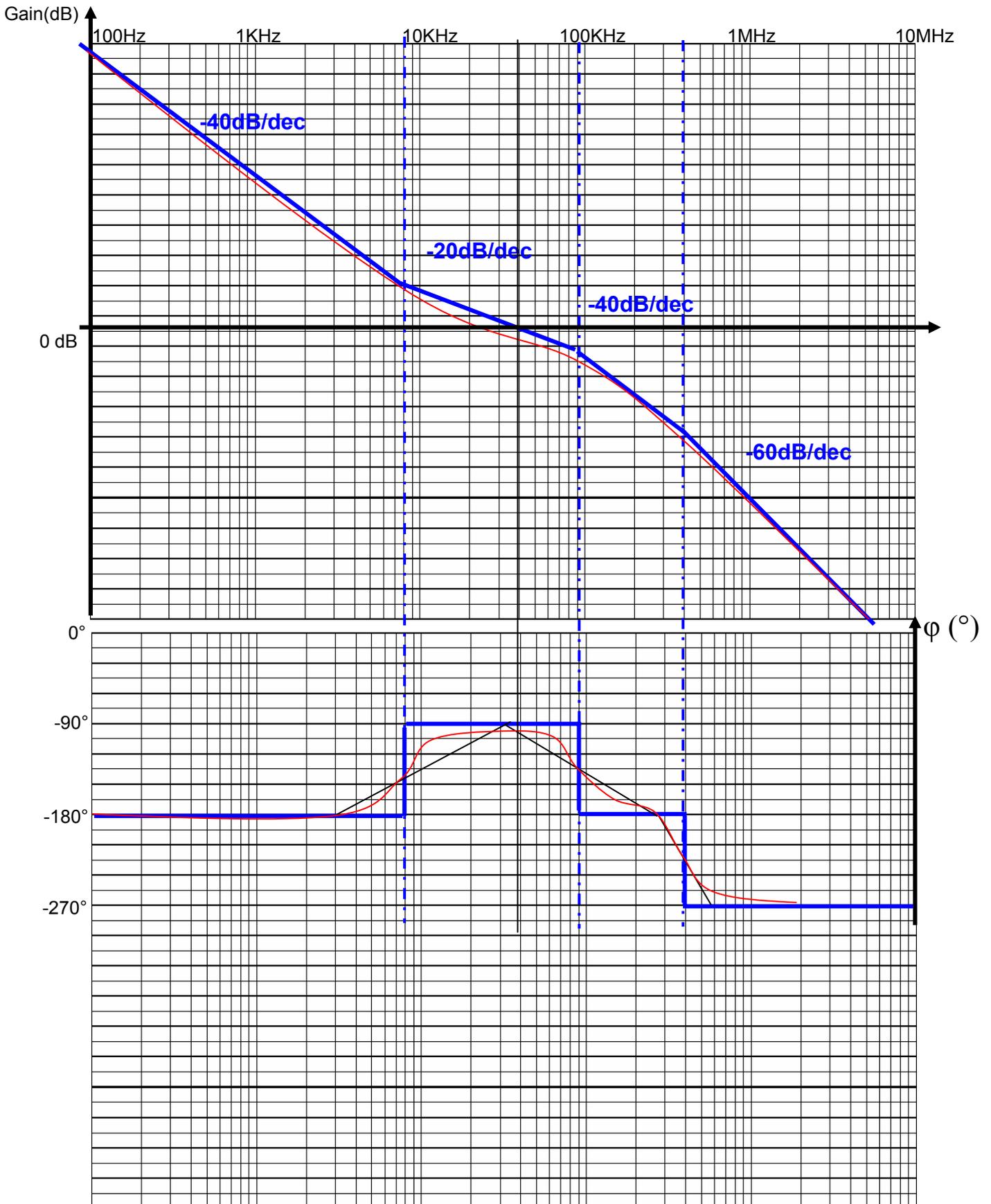
- b) Compléter le schéma bloc du document réponse DR4, liant l'expression de la fréquence instantanée $F(p)$ à la phase instantanée $\varphi(p)$. Dans le cas particulier où $f(t) = \text{Constante} = f_c$, exprimer $\varphi(p)$ en fonction $F(p)$.



- c) Compléter le schéma – bloc du document réponse DR5 en faisant apparaître les fonctions de transfert.



e) Tracer sur le document réponse DR6, les diagrammes de Bode asymptotiques et approchés de gain et de phase de la fonction de transfert en boucle ouverte $T_{BO}(f) = F_{div}(f) / \mathcal{E}(f)$, puis déterminer graphiquement les marges de phases et de gain ainsi que les fréquences associées à chacune de ces marges. Discuter de la stabilité de la boucle.



Correction du sujet d'électronique (agrégation Interne 2006)

On montre que la fonction de transfert simplifiée en boucle fermée $Fout(p)/Fref(p)$ peut se mettre sous la forme suivante :

$$\frac{Fout(p)}{Fref(p)} = T_{BF}(p) = \frac{D}{N} \frac{(1 + \tau d \cdot p)}{\left(1 + \frac{2m}{\omega_0} p + \frac{p^2}{\omega_0^2}\right) \cdot (1 + \tau b \cdot p) \cdot (1 + \tau c \cdot p)}$$

$$\tau d \approx 18,48 \mu\text{s}$$

$$\tau b \approx 14,4 \mu\text{s}$$

$$\tau c \approx 382 \text{ ns}$$

$$\omega_0 \approx 344,174 \cdot 10^3 \text{ rad/s}$$

$$m \approx 0,636$$

- f) **Expliquer l'influence du polynôme numérateur sur les comportements dynamiques et harmoniques de la boucle. Quelle méthode de correction a été envisagée par le concepteur ? Justifier.**

Le polynôme numérateur permet de :

Assurer la stabilité du système (avance de phase au voisinage du point -1)

Améliorer les performances dynamiques du système par compensation pôle dominant T_b ,

Il s'agit d'une correction par compensation de pôle dominant.

- g) **Déterminer les erreurs statiques, de traînage puis d'accélération du synthétiseur de fréquence. Conclure sur la précision de cet asservissement.**

Equation de l'erreur statique : théorème valeur finale :

$$\lim_{p \rightarrow 0} p \cdot [Fout(p) - Fref(p)] = \lim_{p \rightarrow 0} p \cdot Fref(p) \cdot [T_{BF}(p) - 1]$$

Calcul de l'erreur statique :

Erreur statique = 0 ;

Erreur de traînage = 0

Erreur d'accélération = Cste

Cet asservissement de fréquence est très précis et particulièrement adapté aux brusques transitions.

- h) **On suppose le signal modulant de type binaire. Expliquer brièvement pourquoi le temps de réponse à 1% permet d'approximer le rythme binaire théorique maximum de $m(t)$.**

On suppose que le signal modulant engendre une consigne échelon lors d'une transition binaire. En supposant le synthétiseur stabilisé au bout d'un certain temps en réponse à cet échelon, on peut alors considérer que ce temps correspond au délai minimum séparant deux bits transmis successivement. Un temps de réponse à 1% semble une bonne limite si le discriminateur de fréquence du récepteur utilisé possède une immunité au bruit lui permettant de s'affranchir de cette incertitude.

Correction du sujet d'électronique (agrégation Interne 2006)

On montre que la réponse temporelle indicielle de la PLL à un échelon de fréquence Δf lié à une variation instantanée (mais suffisamment faible) du rapport N/D peut être approximée par :

$$f_{out}(t) = \Delta f - \frac{\Delta f}{\sqrt{1-m^2}} \cdot e^{(-m \cdot \omega_0 \cdot t)} \cdot \cos(\omega_0 \cdot \sqrt{1-m^2} \cdot t + \varphi)$$

- i) **Le concepteur a choisi un débit binaire de 19200 bits par secondes pour une excursion en fréquence de 5 KHz, justifier ce choix.**

On calcul le temps de réponse à 1%, à l'aide de l'enveloppe de la réponse indicielle : $22\mu s$

Ceci impose une fréquence limite supérieure de 45KHz, ce qui correspond à un débit binaire maximum de 45 Kbits par seconde. 19200 bits/s étant inférieur, ce choix semble tout à fait adapté.

- j) **Expliciter qualitativement les conséquences de l'analyse qui vient d'être faite sur le spectre du signal modulé. Mettre en évidence les avantages et les défauts de ce type de synthétiseur.**

Le fait que les transitions ne soient ni instantanées, ni parfaitement stables (dépassements de fréquence) engendre un étalement du spectre du signal émis, annulant ainsi l'hypothèse simplificatrice de l'énoncé. Cet étalement impose au récepteur de posséder un discriminateur de fréquence capable de s'affranchir des dépassements de fréquence, qu'il est alors nécessaire de limiter.

L'avantage essentiel de ce type de synthétiseur, est qu'il permet avec un seul circuit oscillateur de générer des signaux modulés en fréquence dans une plage de fonctionnement paramétrable de manière logicielle.

L'inconvénient majeur étant, du fait de la mise en œuvre d'un procédé de régulation, une limite relativement basse de débit binaire, accompagné d'un étalement du spectre qui nécessite, du point de vue du récepteur, un dispositif de démodulation et de décodage des données suffisamment robuste.

- k) **Calculer le dépassement de fréquence maximum atteint lors du régime transitoire de la réponse indicielle précédente.**

L'amplitude du premier dépassement est fixé par :

$$F_{\max} = \Delta f \cdot \left(1 + e^{-\frac{\pi \cdot m}{\sqrt{1-m^2}}} \right)$$

$F_{\max} = 5,375$ kHz, soit un dépassement relatif de fréquence de 7,5% environ.

Q18. Étude de l'adaptation de puissance

- a) On souhaite obtenir une puissance de sortie du transmetteur de +14 dBm dans la bande des 433MHz, Donner l'ensemble des paramètres et composants à fixer en les identifiant puis en précisant leurs valeurs pour obtenir ce résultat. Exprimer en milliwatts la puissance de sortie correspondante.

$$(dBm = 10 \cdot \log_{10}(P / 0.001)),$$

Pour ATRF211 :

Paramètre Hardware : Rpower = 10K

Paramètre Software : Registre TXLVL = 111

- b) L'antenne présente une amplification de puissance de +2 dBi, à la fréquence nominale. Définir le dBi.

décibels isotropiques [dBi].

- c) Calculer la puissance du signal émis dans la bonne direction.

$$\text{Puissance rayonnée [dBm]} = \text{puissance d'émetteur [dBm]} - \text{perte de propagation [dB]} + \text{gain d'antenne [dBi]}$$

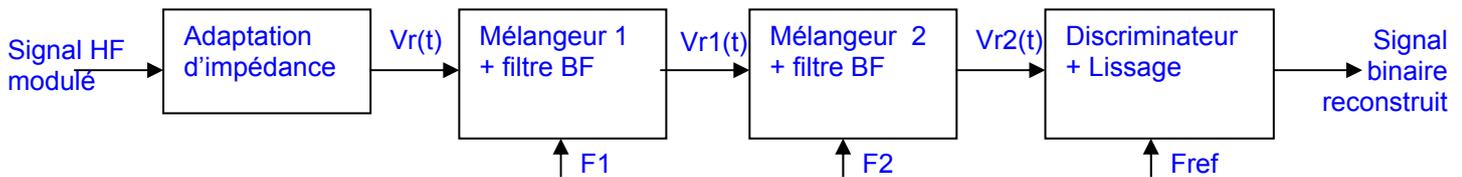
$$25mW + 15mW = 40 \text{ mW}$$

B.3 Etude du récepteur intégré

Q19. Principe de fonctionnement du récepteur

- a) Donner un schéma fonctionnel simplifié du récepteur intégré. Indiquer le type et le principe de fonctionnement de ce récepteur.

Il s'agit d'un récepteur intégrant un démodulateur superhétérodyne à double changement de fréquence programmable par synthétiseur avec discriminateur de fréquence et lissage de données.



On donne la forme du signal reçu : $V_r(t) = A_r \cdot \cos[2\pi[f_r + m(t) \cdot \Delta f] \cdot t]$

- b) Donner l'équation du signal en sortie de chaque étage de changement de fréquence (après filtrage) et montrer l'intérêt de ce type de structure au regard des variations relatives de fréquences et des caractéristiques des composants utilisés dans ce système.

$V_{r1}(t) = A_r \cdot \cos[2\pi[f_r + m(t) \cdot \Delta f] \cdot t] \cdot \cos(2\pi \cdot F_1 \cdot t)$ dont on ne garde que la composante BF :

$$V_{r1}(t) = (A_r / 2) \cdot \cos[2\pi[f_r - F_1 + m(t) \cdot \Delta f] \cdot t]$$

$V_{r2}(t) = (A_r / 2) \cdot \cos[2\pi[f_r - F_1 + m(t) \cdot \Delta f] \cdot t] \cdot \cos(2\pi \cdot F_2 \cdot t)$ dont on ne garde que la composante BF :

$$V_{r2}(t) = (A_r / 4) \cdot \cos[2\pi[f_r - F_1 - F_2 + m(t) \cdot \Delta f] \cdot t]$$

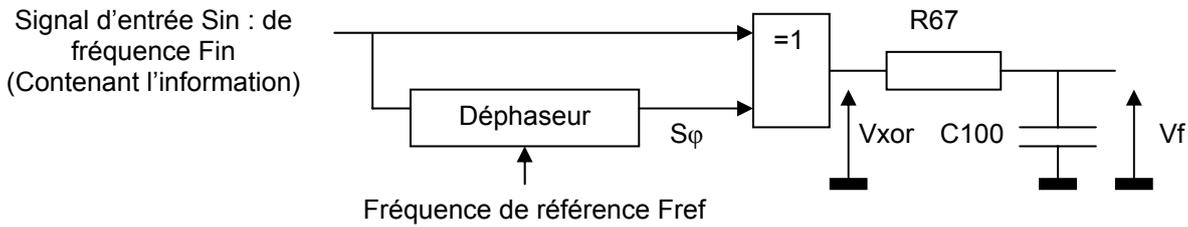
On constate que pour une excursion en fréquence du signal modulé correspondante à Δf , à la sortie du deuxième étage mélangeur, la variation relative de ce terme au regard des fréquences fixes peut considérablement augmenter : $\Delta f / f_r \ll \Delta f / (f_r - F_1 - F_2)$. Cette observation favorise la mise au point d'un dispositif de sélection de fréquence, nécessaire à la reconstruction du signal modulant.

- c) Donner le principe de fonctionnement d'un filtre SAW. Quel est l'intérêt de ce type de filtre ?

Un filtre à onde de surface utilise deux antennes pour réaliser un filtre spectral. La première antenne est une antenne d'émission constituée d'émetteurs espacés régulièrement. L'antenne de réception à une structure analogue, alignée avec la première dans la direction axiale. La distance spatiale entre émetteurs et récepteurs respectifs à chaque antenne est de l'ordre de la longueur d'onde, offrant alors au dispositif un filtrage fréquentielle très sélectif autour de la longueur d'onde utilisée.

Q20. Étude du discriminateur de fréquence

On donne le synoptique du discriminateur de fréquence intégré :



Sin est un signal périodique rectangulaire de fréquence Fin et d'amplitude E de 3 V. $V_{oh_{min}}$ de la porte XOR = 3 V = E.

Avec le signal S_{ϕ} identique à Sin mais déphasé de $\phi_{S_{\phi}}$.

$\phi_{S_{\phi}}$ est liée à Fin et Fref par la relation (développement de Taylor limité à l'ordre 1 de la fonction de transfert du déphaseur pour de faibles variations de Fin autour de Fref) :

$$\phi_{S_{\phi}} = 2,73 \cdot ((Fin/Fref) - 0,8).$$

On rappelle que $Fin = Fref + m(t) \cdot \Delta f$

a) Expliciter le rôle de cette fonction.

Cette fonction permet de transformer une variation de fréquence en variation de tension, images de l'évolution du signal modulant.

b) Exprimer le rapport cyclique α du signal Vxor en fonction de m(t), puis en déduire l'expression de la valeur moyenne de Vf(t).

$$m(t)=0 \Rightarrow Fin=Fref \Rightarrow \phi_{S_{\phi}} = 2,73 \times 0,2 = 0,546$$

$$m(t)=1 \Rightarrow Fin=Fref \Rightarrow \phi_{S_{\phi}} = 2,73 \cdot ((Fref + m(t) \cdot \Delta f) / Fref) - 0,8$$

$$\alpha = (2,73 / \pi) \cdot ((Fref + m(t) \cdot \Delta f) / Fref) - 0,8$$

$$\langle Vf(t) \rangle = \alpha \times E \text{ (avec } E = 3V)$$

c) Donner la sensibilité (en V/kHz) de ce discriminateur de fréquence pour Fref = 455 kHz, puis calculer $\langle Vf(t) \rangle$ pour une excursion en fréquence du signal reçu de 5 kHz.

pour :
 $\Delta f = 5kHz$
 $Fref = 455 kHz$

$$\text{Sensibilité} = E \times 2,73 / (455 \pi) = 0,018 / (2\pi) \text{ V/kHz}$$

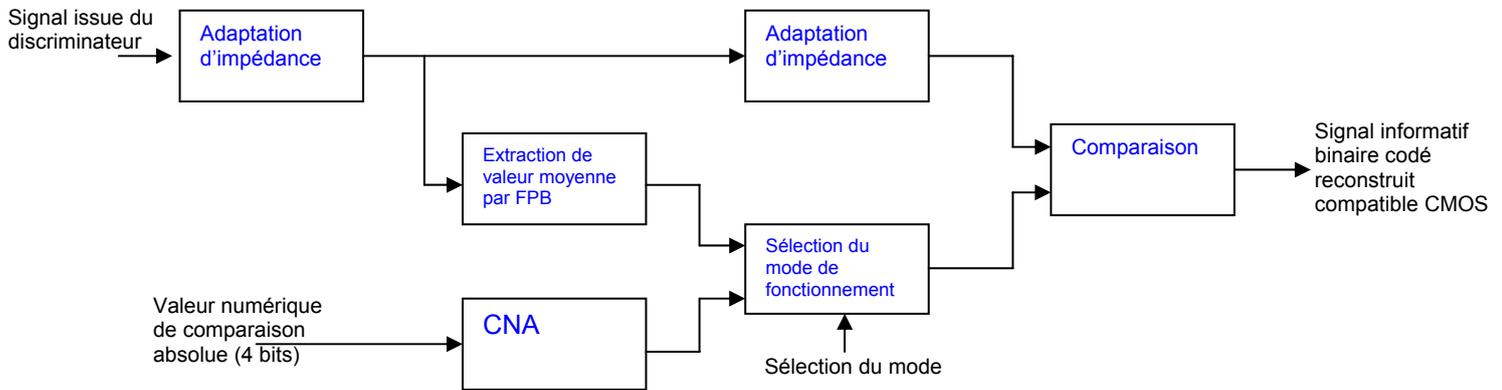
$$\langle Vf(t) \rangle = 1,728 / \pi \text{ V}$$

Q21. Principe du « conditionneur de données » (DataSlicer)

a) Expliciter le rôle de cette fonction et indiquer son principe de fonctionnement.

Le « conditionneur de données » permet de convertir la tension de sortie issue du discriminateur de fréquence en Niveaux Logiques compatibles CMOS. Il possède deux modes de fonctionnement permettant d'adapter le traitement qu'elle réalise en fonction de la méthode de codage. C'est cette fonction qui permet de reconstruire le signal informatif.

Son principe de fonctionnement est basé sur l'utilisation de comparateurs à seuils paramétrables, comme l'indique le schéma fonctionnel suivant :



b) Compte tenu du type de codage de l'information binaire utilisé pour $m(t)$, donner le mode de fonctionnement du « conditionneur de données », sachant que l'on n'exclut pas la transmission successive et prolongée de nombreux bits identiques (suite de 0 ou de 1).

On utilise un codage de l'information binaire par motifs NRZ, ce qui autorise une suite prolongée possible d'états identiques, le mode de fonctionnement utilisant la moyenne du signal reçu (EXTERNAL mode) s'avère donc risqué (conseillé pour les codages biphasés...), on préférera donc le mode de fonctionnement interne (INTERNAL MODE), avec utilisation d'une valeur fixe imposée par le CNA.

B.4 EXPLOITATION PÉDAGOGIQUE

On souhaite exploiter le sous-système qui vient d'être étudié afin d'introduire la transmission de données numériques en **STS Systèmes Electroniques**.

On s'intéresse au champ technologique TELECOMMUNICATION, TELEPHONIE ET RESEAUX TELEPHONIQUES pour développer le questionnement pédagogique demandé.

L'approche sera limitée à la transmission de données par voie hertzienne en modulation de fréquence et aux concepts abordés dans l'extrait de référentiel fourni en annexe.

Q22. Proposer une problématique et une mise en situation permettant d'introduire ce mode de transmission en prenant pour support ce système. Délimiter soigneusement l'analyse et l'étude proposée aux étudiants. Préciser les supports pédagogiques utilisés.

Eléments de l'approche	Critères d'évaluation
Présentation générale	Clarté : Exactitude : Délimitation : Pertinence de l'Outils de description envisagé :
Problématique de la transmission	Définition de l'approche Délimitation Points abordés
Délimitation de l'étude	Objectifs opérationnels et conceptuels Pertinence de l'approche Exactitude vis-à-vis du référentiel Exactitude technique Contraintes matérielles Support envisagés

Q23. Élaborer les structures des séquences et progressions pédagogiques, en mettant en évidence les connaissances à mobiliser ou à développer pour atteindre les objectifs du référentiel. Détailler les déroulements et les objectifs intermédiaires des différentes activités.

Eléments de l'approche	Critères d'évaluation
Structure des séquences	Pertinence de l'approche Progression : Méthodologie envisagée
Objectifs visés	Prérequis nécessaires : Pertinence au regard du référentiel Objectifs intermédiaires nécessaires Points associés aux disciplines connexes
Activités envisagées	Pertinence de l'activité Positionnement de l'activité dans la séquence Définition et délimitation des compétences opérationnelles et théoriques.

Q24. Proposer une approche critique des concepts abordés dans votre développement pédagogique au regard de l'état de l'art et en faisant l'analogie avec des systèmes utilisés dans la vie quotidienne (télévision numérique, réseaux, etc.). Expliciter les contraintes et limites technologiques ou théoriques de votre approche vis-à-vis du niveau des étudiants de STS SE.

Éléments de l'approche	Critères d'évaluation
Critique	Richesse des exemples comparatifs Connaissance des technologies récentes Validité des exemples choisis
Contraintes de associées à l'étude	Exposé des : Contraintes théoriques Contraintes financières Contraintes techniques Contraintes matérielles

Attentes du jury :

On attend une production maximale de 2 à 4 pages format A4.

Critères d'évaluation du candidat :

- L'exactitude technique des documents présentés et le respect du système proposé,
- La pertinence pédagogique de la mise en situation choisie et des caractéristiques principales retenues,
- La justification des contraintes matérielles et temporelles,
- La validité et la réalité technologique des concepts abordés,
- Le respect des exigences du référentiel,
- La qualité des descriptions et des explications proposées (exactitude technique, précision et concision, expression écrite, adéquation par rapport au contexte).

C ANALYSE ET IMPLÉMENTATION DE L'ACTEUR LOCOMOTION

Dans cette partie nous allons nous placer dans la situation de l'électronicien qui doit implémenter une carte de pilotage de moteurs asservis en vitesse ou position à partir d'une consigne reçue par un canal de transmission Modbus. Sachant que la même carte est utilisée pour la propulsion et pour le positionnement d'accessoires motorisés, notre étude porte sur le pilotage en vitesse pour la locomotion du robot.

C.1 ETUDE DE LA STRUCTURE MATÉRIELLE DE LA CARTE

Indications techniques :

- Le schéma de la carte est fournie en annexe.
- La fréquence des signaux MLI est fixée à 613 Hz.
- La DEL D10 s'allume lorsque l'un des moteurs rencontre une surcharge en couple.
- Les vitesses de rotation sont exprimées en radian par seconde.
- Les moteurs sont de type S220F du constructeur PARVEX équipés de freins à manque de courant et d'un codeur incrémental solidaire de l'axe moteur de 1024 points par tour, délivrant deux signaux en quadrature de phase, disponibles sur des sorties à collecteur ouvert de transistors PNP.
- Lorsque les moteurs sont à l'arrêt (tension d'alimentation nulle), le frein doit impérativement être activé.
- L'axe 1 correspond au moteur gauche et l'axe 2 au moteur droit du robot.
- Si AXE2PHA = AXE1PHA = 1 et AXE2PHB = AXE1PHB = 0 le robot avance en ligne droite à vitesse maximale.
- Si le signal BRAKES = 1, alors, les deux freins moteurs à manque de courant sont actifs.

C.1.1 ETUDE DE L'ALIMENTATION DES MOTEURS

La carte variateur fonctionne en mode locomotion :

- le contenu de l'adresse 0x0011 de la table d'échange MODBUS représente la consigne de vitesse de déplacement du robot :
0x0011 > 0 : avance, 0x0011 = 0 : manœuvre sur place, 0x0011 < 0 marche arrière
- le contenu de l'adresse 0x0012 de la table d'échange MODBUS représente la consigne de direction de déplacement du robot :
0x0012 > 0 : virage à droite, 0x0012 = 0 : tout droit, 0x0012 < 0 virage à gauche.

L'axe 1 correspond au moteur gauche et l'axe 2 au moteur droit du robot.

Q25. Commande d'un pont en H

Sauf indication contraire, on s'intéresse à la commande de l'axe 2, le principe de commande de l'axe 1 étant similaire.

- a) *Donner la relation liant la tension moyenne aux bornes du moteur au rapport cyclique α des signaux AXEPH2A ou AXEPH2B, sachant que pour un sens de rotation donné, l'un des deux signaux est en permanence au 0 logique (on négligera la chute de tension dans la résistance shunt).*

$$V_{moy} = \alpha \times V_{alimMoteur} = \alpha \times 24$$

Les signaux MLI permettant de piloter l'axe 2 sont produits par le Timer 0 de l'ATMEGA88 fonctionnant en mode « Phase Correct PWM » avec une résolution de 8 bits, le compteur évoluant entre 0 et 255.

- b) *Identifier les registres du Timer0 de l'ATMega88 mis en jeu et déterminer leur contenu pour obtenir le fonctionnement souhaité pour chaque sens de rotation. Préciser le facteur de pré division N à appliquer au signal d'horloge interne (f_{clk-IO}).*

Dans TCCR0B : les bits 0 – 2 : sélection du facteur de pré division :

$$F_{mli} = f_{clk_io} / (N \times 510) \text{ avec } F_{mli} = 613 \text{ Hz.}$$

$$\Rightarrow N = 20 \cdot 10^6 / (510 \times 613) = 64$$

Registre / sens de rotation	1	2
TCCR0A	10100001	10100001
TCCR0B	00000011	00000011
TCNT0	Valeur compteur (lecture)	Valeur compteur (lecture)
OCR0A : Axe2PhA	OCROA : variable (consigne MLI)	OCROA = 0
OCR0B : Axe2PhB	OCR0B = 0	OCROB : variable (consigne MLI)
TIMSK0	0	0
TIFR0	0	0

c) *Exprimer le rapport cyclique α en fonction des contenus des registres OCR0A et OCR0B, puis montrer que le sens de rotation du moteur peut être fixé à l'aide de ces deux registres.*

$$\alpha = \text{OCR0n} / 255$$

n = A ou B suivant le sens de rotation

Pour un sens de rotation donné, l'un des signaux AxePh est nul, ceci implique que la sortie correspondante du μC reste à 0.

Ceci peut être effectué de deux manières :

- Forçage de la sortie à 0 à l'aides des registres d'entrée / sortie : DDRx et PORTx, avec OCR0n déconnecté
- Mise à 0 de la valeur de comparaison dans le registre OCR0n correspondant (solution retenue ici, car plus simple)

d) *On souhaite asservir la vitesse de rotation. Montrer que suivant le sens de rotation souhaité, il faudra sélectionner le registre à piloter.*

Suivant le sens de rotation souhaité, un seul demi pont doit-être piloté, ainsi, un seul registre OCR0n doit être commandé, l'autre contenant la valeur nulle.

Ces deux registres sont codés sur 8 bits alors que les consignes sont codées sur 12 bits significatifs, en tenant compte du signe CC2 (forçage à 0 de l'un des registres), ainsi les valeurs à positionner dans

Remarque Optionnelle :

les registres seront comprises entre 0 et 255 :

Si Consigne >0 alors valeur registre OCRxA = valeur décimale absolue des bits 10 → 2 et registre OCRxB = 0

Si Consigne <0 alors valeur registre OCRxA = 0 et registre OCRxB = 2048 - valeur décimale absolue des bits 10 → 0

- e) Sachant que l'autre pont en H est piloté de manière similaire par les sorties OC1A et OC1B (cf. schéma électrique) correspondant respectivement aux registres OCR1A et OCR1B du Timer1 de l'ATMega88, compléter le tableau du document réponse DR7.

Document réponse DR 7 (Q25.e)

Indiquer entre parenthèse pour chaque registre à piloter le nom et la valeur du registre µC inutilisé.

Contenu du mot MODBUS 0x0011 V.AVANCE	Contenu du mot MODBUS 0x0012 DIRECTION	Nom du Registre à piloter pour le moteur Gauche (Nom et valeur du Registre inutilisé)	Nom du Registre à piloter pour le moteur Droit (Nom et valeur du Registre inutilisé)	Etat logique du signal BRAKES
0x0400 1024d	0x0000 0d	0x0400=>OCR1A=128 (OCR1B=0)	0x0400=>OCR0A=128 (OCR0B=0)	0
0x0400 1024d	0x0200 512d	0x200=>OCR1A = 64 (OCR1B=0)	0x600=>OCR0A = 192 (OCR0B=0)	0
0x0000 0d	0x0000 0d	0=>OCR1A = 0 (OCR1B=0)	0=>OCR0A = 0 (OCR0B=0)	1
0xFC00 -1024d	0x0100 256d	0xFB00=>OCR1B = 160 (OCR1A=0)	0xFD00=>OCR0B = 96 (OCR0A=0)	0
0xFC00 -1024d	0xFF00 -256d	0xFD00=>OCR1B = 96 (OCR1A=0)	0xFB00=> 0xFB00 => OCR0B = 160 (OCR0A=0)	0

C.1.2 MESURE ET CONVERSION DU COURANT MOTEUR

Sauf indication contraire, on s'intéresse à l'axe 2, le principe de mesure du courant de l'axe 1 étant similaire.

Q26. Etude de la chaîne analogique

a) Donner la fonction de transfert liant le courant moteur à la tension IAXE2.

$$\frac{I_{axe2}(p)}{I_{mot}(p)} = \frac{R27 \cdot (R28 + R26)}{R28} \cdot \frac{1}{1 + R117 \cdot C16 \cdot p}$$

AN :

$$\frac{I_{axe2}(p)}{I_{mot}(p)} = \frac{0,93}{1 + 4,7 \cdot 10^{-3} \cdot p}$$

b) Sachant que l'entrée du CAN intégré contient un suiveur, montrer que la tension IAXE2 représente approximativement la valeur moyenne sur une période MLI du courant moteur.

Période MLI = 613 Hz, fréquence de coupure du filtre = 33 Hz

⇒ $F_{mli} > 10 \cdot f_c$

⇒ On peut considérer que le signal issue du fondamental de courant MLI est atténué, le signal résiduel étant donc proche de l'image de la valeur moyenne du courant.

c) Donner la relation liant le couple moteur au courant moteur, à l'aide des documents constructeur. Exprimer numériquement cette relation.

Couple Moteur = $K_c \times I_{moteur}$ – Couple résistant frottements secs – Coefficient de couple de frottements visqueux x Vitesse de rotation

Couple moteur = 0,057. Imot si couples résistants négligés

d) Quelle peut être l'utilité du signal DGAXE2 ? Expliquer.

Permet de détecter un défaut : Surcharge ou surchauffe de l'interrupteur statique ou aucune charge connectée (rupture de bobinage ou absence de moteur).

Q27. Etude de l'acquisition de l'information courant moteur par le microcontrôleur

a) Donner la plage de variation du courant et de couple moteur mesurable par le microcontrôleur (la tension de référence du CAN est de 5V). Justifier.

Vref CAN = 5V

⇒ $I_{axe2 \max} = V_{ref} \times 1023 / 1024$

⇒ $I_{axe2 \max} = 4,951 \text{ V}$

⇒ $I_{mot \max} = I_{axe2 \max} / 0,93 = 5,37 \text{ A}$

⇒ Couple moteur maximum mesurable = $K_c \times I_{mot \max} = 0,057 \times 5,37 = 0,306 \text{ N.m}$

⇒ $0 \text{ N.m} \leq \text{Couple moteur maximum mesurable} \leq 0,306 \text{ N.m}$

b) Donner la plus petite variation de couple mesurable par le microcontrôleur.

1LSB = 48,8 mV soit $I_{mot} = 5,25 \text{ mA}$

⇒ Couple minimum mesurable = $0,057 \times 0,00525 = 0,3 \text{ mN.m}$

- c) *Quelle est l'atténuation (en dB) du fondamental du signal MLI ? Quelle est l'influence de ce signal sur la précision de la mesure ? Proposer une méthode numérique permettant d'améliorer cette précision.*

$$G(\text{dB}) = 20 \times \log \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}} \right)$$

Atténuation = 25 dB

La précision de la mesure peut être altérée si le lissage engendré par la self de l'induit moteur est insuffisant, dans ce cas, les fluctuations peuvent être supérieures au courant minimum mesurable (LSB du CAN) et donc influencer sur la qualité de la mesure.

On peut alors envisager d'implémenter dans l'algorithme d'acquisition du courant moteur un filtre numérique dont l'ordre dépend de la valeur du LSB, ou un algorithme de calcul de moyenne glissante. Dans tous les cas de figure, on veillera à ce que cet algorithme ne soit pas pénalisant pour la boucle de régulation de pilotage des moteurs.

- d) *Calculer la tension IAXE2 pour le couple nominal du moteur.*

Couple nominal = 0,225 N.m

⇒ I_{mot} nominal = 3,95 A

⇒ I_{axe 2} nominal = 3,67 V

- a) *En vous aidant des résultats des questions précédentes et des documents constructeurs, exprimer littéralement puis numériquement l'ensemble des paramètres des modèles analogiques (moteur, chaîne de mesure du courant, etc.).*

Chaîne de mesure de courant :

$$K_{FI} = 0,93$$

$$T_{FI} = 0,0047 \text{ s}$$

Mécanique moteur + entraînement :

$$K_m = 1/K_{fv} = 75187$$

$$T_m = J_m/K_{fv} = 218000 \text{ s}$$

Electrique moteur :

$$K_e = 1/R = 0,892$$

$$T_e = L/R = 0,6 \text{ ms}$$

$$K_i = 0,057 = K_E$$

- b) *Que représente l'excitation externe $Cr(p)$? Donner un exemple concret provoquant une variation de $Cr(p)$.*

$Cr(p)$ représente le couple résistant de la chaîne cinématique. C'est une perturbation. Une variation de $Cr(p)$ peut-être engendré par un obstacle ou un changement d'angle du support du robot (plan incliné, obstacle, .)

La grandeur $N_{PWM}(z)$ représente le contenu de l'un des registre OCRxx.

- c) *Exprimer la relation liant N_{PWM} à la tension moyenne aux bornes du moteur pour un sens de rotation fixé et justifier la présence du bloqueur d'ordre zéro (B.O.Z.).*

$\langle V_{mot} \rangle =$ rapport cyclique x tension d'alimentation moteur

$$\text{Rapport cyclique} = N_{PWM} / 255$$

$$F_{pwm}(p) = \text{tension d'alimentation moteur} \times N_{PWM} / 255$$

$$F_{pwm}(p) = 24 \times N_{PWM} / 255$$

Le bloqueur d'ordre 0 symbolise le fait que la tension moyenne aux bornes du moteur est fixé pendant une période MLI, il s'agit là d'un modèle comportemental approché.

- d) *Expliquer brièvement l'intérêt, du point de vue des performances de l'asservissement, de la boucle imbriquée de régulation de courant.*

Cette boucle imbriquée, permet d'augmenter considérablement les performances de la régulation du point de vue du temps de réponse, car elle permet de diminuer l'influence de la constante de temps mécanique du système de motorisation. Ainsi par le biais de cet asservissement de couple, on peut agir sur le temps de réponse du système. Toutefois, l'énergie nécessaire dans les phases d'accélération brutale peut engendrer de forts appels de courants, ou des consignes de tension pouvant engendrer une saturation, c'est pourquoi un tel dispositif est souvent accompagné d'un écrêtage, représenté dans le modèle numérique par une non linéarité de type limiteur.

- e) Calculer le temps que met le robot départ arrêté pour atteindre la vitesse de 1 m/s sur terrain plat si le couple moteur reste égal à sa valeur nominale lors de la phase d'accélération (supposée constante).

Dans le cas où le robot se trouve sur une surface plane, la principale force à vaincre est son inertie. On néglige les frottements (pour supposer l'accélération constante on doit négliger les frottements visqueux) et l'on obtient :

$$Jm \cdot \frac{d\Omega}{dt} + Cr + Kfv \cdot \Omega = Cm = 2,9 \cdot \frac{d\Omega}{dt} = 0,225$$

Ainsi, l'accélération angulaire de chaque arbre moteur = $0,07758 \text{ rad/s}^2$

Ramenée en vitesse linéaire en tenant compte du réducteur et de la chaîne de transmission, on obtient :

$$\gamma \cdot t_0 = V$$

γ : accélération

$$\gamma = \frac{0,07758 \times 2\pi \times 0,13}{13} = 0,0048 \text{ m.s}^{-1}$$

$$t_0 = \frac{V}{\gamma} = \frac{1}{0,0048} = 208 \text{ s}$$

on obtient un temps t_0 de 208s !

Q29. Extraction des équations de récurrence

- a) Donner les valeurs numériques des coefficients K_{MI} et K_{ME} .

Si $I_{mot}=10\text{mA}$, la valeur théorique de conversion n'est pas entière.

On sait que :

$K_{MI} \times$ Valeur théorique de conversion CAN pour un courant moteur de $10\text{mA} = 1$

Pour 10mA : Valeur théorique de conversion CAN = $10/5,25 = 1,9048$.

D'où : $K_{MI} = 1/1,9048 = 0,525$

Résolution du codeur : 1024 points/tours

Résolution de mesure de vitesse : 0,1 rad/s

$1024/2\pi = 162,974$ points

- ⇒ pour 0,1 rad on à 16,2974 points
- ⇒ On veut $N_s = 1$ pour 0,1 rad/s
- ⇒ $K_{ME} \times 16,29 = 1$
- ⇒ $K_{ME} = 1/16,2974 = 0,006136$

On donne la forme général des correcteurs Cv(z) et Ci(z) :

$$Cv(z) = Kcv \cdot \left(1 + \frac{Te}{Tiv} \cdot \frac{1}{z-1} + \frac{z-1}{Kdv \cdot (z-z_0)} \right)$$

Où :

Tiv est la constante d'intégration

Kdv : paramètre de mise à l'échelle de l'action dérivée

Kcv : gain statique du correcteur

Z₀ : pôle d'adoucissement de l'action dérivée

$$Ci(z) = Kci \cdot \left(1 + \frac{Te}{Tii} \cdot \frac{1}{z-1} \right)$$

Où :

Tii est la constante d'intégration

Kci : gain statique du correcteur

b) Exprimer la relation de récurrence liant Ni(kTe) à $\mathcal{E}_N(kTe)$.

En exploitant la fonction de transfert en z du correcteur, on peut écrire :

$$\begin{aligned} \varepsilon(z) \cdot Kcv \left[Tiv \cdot Kdv \cdot z_0 - Te \cdot Kdv \cdot z_0 + Tiv + z \cdot (Te \cdot Kdv - Tiv \cdot (2 + Kdv \cdot (z_0 + 1))) + z^2 \cdot (Tiv \cdot (Kdv + 1)) \right] \\ = Ni(z) \cdot Tiv \cdot Kdv \left[z_0 - z \cdot (z_0 + 1) + z^2 \right] \end{aligned}$$

En multipliant à gauche et à droite par z² puis en revenant dans l'espace temporel échantillonné, il vient :

$$Ni(k.Te) = \frac{Kcv}{Tiv \cdot Kdv} \cdot \left\{ \begin{aligned} &Tiv \cdot (1 + Kdv) \cdot \varepsilon(k.Te) + \\ &[Te \cdot Kdv - Tiv \cdot ((z_0 + 1) \cdot Kdv + 2)] \cdot \varepsilon((k-1).Te) + \\ &[Tiv \cdot (Kdv \cdot z_0 + 1) - Te \cdot Kdv \cdot z_0] \cdot \varepsilon((k-2).Te) \end{aligned} \right\} + [z_0 + 1] Ni((k-1).Te) - z_0 \cdot Ni((k-2).Te)$$

c) Exprimer la relation de récurrence liant N_{PWM}(kTe) à $\mathcal{E}_I(kTe)$.

Avec la même démarche que précédemment, on obtient :

$$N_{PWM}(k.Te) = K_{CI} \cdot \mathcal{E}_I(k.Te) + K_{CI} \left(\frac{Te}{Tii} - 1 \right) \cdot \mathcal{E}_I((k-1).Te) + N_{PWM}((k-1).Te)$$

d) Justifier la présence du limiteur s'appliquant à la valeur de Nic(z). Donner un exemple montrant l'intérêt de ce limiteur. Calculer la valeur limite de Nic, sachant que le courant moteur ne doit pas excéder 5,1 A.

Le limiteur, permet d'éviter des consignes de courant trop élevée. Cette valeur limite peut-être choisie par le concepteur. Cette fonction permet d'éviter, par exemple, un échauffement trop important de l'induit moteur dans le cas ou des variations importantes de consignes apparaîtrait.

$$Nic_{max} = Nimax = 5,1/10 \cdot 10^{-3} = 510$$

e) Exprimer et calculer Kci permettant d'harmoniser les formats numériques des nombres entiers N_{PWM}(kTe) (codé sur 8 bits) et $\mathcal{E}_I(kTe)$.

Si N_{PWMmax} = 255

$$\Rightarrow \varepsilon_{Imax} \Leftrightarrow \Delta Imot max = 5,1A$$

$$\Rightarrow \varepsilon_{Imax} = 510 \Rightarrow K_{CI} = N_{PWMmax} / 510 = 0,5$$

=> Un simple décalage à droite de 1bit de $\mathcal{E}_i(kTe)$ peut permettre d'harmoniser les formats, car cette information peut être codée sur 9bits non signés du fait qu'elle ne peut dépasser 510 (cf. limiteur)

- f) Sachant que $Nc(z)$ est toujours positif, donner une relation liant $Ncg(z)$ du moteur gauche à $Ncd(z)$ du moteur droit en fonction des contenus des mots MODBUS 0x0011 et 0x0012. On veillera à mettre à l'échelle les consignes en s'aidant d'un facteur multiplicateur. Répertorier la destination des mots $N_{PWM}(kTe)$ correspondant à chaque axe en fonction des sens de rotation imposés par la relation liant les mots MODBUS 0x0011 et 0x0012.

On codera Nc sur 10 bits significatifs (suffisant)

Les contenus des mots 0x0011 et 0x0012 sont codés en CC2 avec 12 bits significatifs (bits de poids faible).

AVANCE 0X0011	DIRECTION 0X0012	Moteur Gauche		Moteur Droit	
			$N_{PWM}(kTe)$		$N_{PWM}(kTe)$
0	0	$Ncg=0$	OCR1A	$Ncd=0$	OCR0A
$2047 \geq Na \geq 0$	$2047 \geq Nd \geq 0$	$(Na-Nd) \geq 0$ $Ncg=(Na-Nd)/2$	OCR1A	$0 < Na+Nd < 2048$ $Ncd=(Na+Nd)/2$	OCR0A
		$(Na-Nd) < 0$ $Ncg=(Nd-Na)/2$	OCR1B	$Na+Nd > 2047$ $Ncd=1024$	OCR0A
$2047 \geq Na \geq 0$	$-2048 \leq Nd < 0$	$0 < Na-Nd < 2048$ $Ncg=(Nd-Na)/2$	OCR1A	$(Na+Nd) \geq 0$ $Ncd=(Na+Nd)/2$	OCR0A
		$(Na-Nd) > 2047$ $Ncg=1024$	OCR1A	$(Na+Nd) < 0$ $Ncd=(-Nd-Na)/2$	OCR0B
$-2048 \leq Na < 0$	$2047 \geq Nd \geq 0$	$Na-Nd < -2048$ $Ncg=1024$	OCR1B	$(Na+Nd) \geq 0$ $Ncd=(Na+Nd)/2$	OCR0A
		$0 > (Na-Nd) > -2048$ $Ncg=Nd-Na$	OCR1B	$(Na+Nd) < 0$ $Ncd=(-Nd-Na)/2$	OCR0B
$-2048 \leq Na < 0$	$-2048 \leq Nd < 0$	$0 < Na-Nd$ $Ncg=(Na-Nd)/2$	OCR1A	$(Na+Nd) < -2048$ $Ncd=1024$	OCR0B
		$(Na-Nd) < 0$ $Ncg=(Nd-Na)/2$	OCR1B	$-2048 < (Na+Nd) < 0$ $Ncd=(-Nd-Na)/2$	OCR0B

Ainsi :

si le signe de $Na-Nd \geq 0$ on fait varier OCR1A, sinon OCR1B

si le signe de $Na+Nd \geq 0$ on fait varier OCR0A, sinon OCR0B

C.2 ETUDE DE LA STRUCTURE LOGICIELLE DE LA CARTE

Le calculateur embarqué sur la carte est un ATMEGA 88 de la société Atmel.

C.2.1 MESURE DE LA VITESSE

Nous rappelons que l'acquisition de la vitesse se fait par l'intermédiaire d'un codeur incrémental, 1024 points par tour, sur l'axe moteur qui fournit deux signaux carrés en quadrature. Nous allons utiliser les deux signaux pour élaborer deux vitesses qui seront ensuite comparées pour éliminer l'aléa de mesure engendré par les vibrations du robot autour de sa position d'équilibre sur le front de détection du codeur.

Q30. On met en œuvre deux compteurs d'impulsions. Préciser la stratégie d'élaboration de la vitesse (en radian par seconde), celle-ci devant être stockée dans un mot de 16 bits et offrir une résolution de 0,1 radian par seconde (nota: la vitesse angulaire maximale du moteur est de 314 rad/s).

- a) **Deux stratégies d'acquisition sont possibles (scrutation ou interruption), justifier le fait que l'acquisition par interruption est la mieux adaptée dans le cas de ce système, en précisant les critères.**

/ Il est important de noter ici que notre entrée d'interruption est une entrée à changement d'état qui nous produira deux interruptions par période de codeur (it sur front montant, it sur front descendant). Il faut donc prendre en compte deux compteurs s'incrémentant 2048 fois par tour de moteur. Ce qui à 50 tours seconde nous donne 10240 incréments par secondes. Sachant que le processeur est capable de réagir à 20 Mhz, on n'a pas de souci majeur de surcharge. */*

L'acquisition par interruption offre deux avantages, le premier est d'être sûr de ne pas manquer de front actif, le second est lié à la durée de stabilité du signal nécessaire pour que l'interruption soit prise en compte, ce qui permet de filtrer les instabilités (rafale d'it à haute fréquence dues aux vibrations)

- b) **En utilisant l'extrait de documentation du microcontrôleur, déterminer les valeurs d'initialisation des registres pour que les interruptions puissent être générées (il est rappelé que les deux codeurs sont branchés respectivement sur les lignes 27 (PCINT12) pour AXE1-XA, 28 (PCINT13) pour AXE1-XB, 15 (PCINT4) pour AXE2-XB, 16 (PCINT3) pour AXE2-XA)**

Les registres concernés sont :

- PCMSK1 ← \$30
- PCMSK0 ← \$18
- PCICR ← \$03
- PCIFR ← %00000000xx x 0/1 suivant source d'IT

- c) **Produire sous format algorithmique la routine de gestion des interruptions.**

```
INTER(cpti)
  Debut
  |
  |      Cpti ← Cpti+1
  |
  Fin
```

d) Fournir l'algorithme du programme d'élaboration de la vitesse.

```
Vit(Cpt1, Cpt2)
Début
    Lire Cpt1
    Lire Cpt2
    SI Cpt1 <> Cpt2
    |   Cpt ← Min(Cpt1, Cpt2)
    FINSI
    Vit ← Cpt - Anccpt
    Anccpt ← Cpt
Fin
```

/* un tel algorithme doit être lancé 10 fois par seconde pour obtenir la précision nécessaire */

C.2.2 MESURE DU COURANT

Les mesures de courant IAXE1 et IAXE2 des deux ponts sont câblées respectivement sur les entrées 23 (ADC 0) et 24 (ADC1) du microcontrôleur.

Les données "mesure de courant à fournir" au logiciel de correction doivent être codées sur 16 bits avec une précision de 10^{-2} A.

Q31.

a) Préciser le canal utilisé pour effectuer cette conversion à l'aide du schéma de la carte.

Nous utilisons les canaux PC0 pour ADC0 et PC1 pour ADC1

b) En utilisant l'extrait de documentation du microcontrôleur, identifier les registres et proposer les valeurs d'initialisation à y placer pour effectuer la conversion.

Les registres concernés sont :

ADMUX ← %0000000x	x ← 0 pour ADC0
	x ← 1 pour ADC1
ADLAR ← \$00	
ADCSRA ← %11100000	autotrig
ADCL et ADCH	pour le résultat de la conversion

c) Déterminer l'instant de fin de conversion pour vérifier que le bit d'état est bien positionné.

La conversion pouvant durer jusqu'à 260 microsecondes, il suffit de consulter, au plus tard à la fin de ce délai, le bit ADIF du registre ADCSRA pour vérifier qu'elle est bien terminée

d) Fournir l'algorithme de traitement de cette acquisition.

Traité en langage clair :

- 1- Sélectionner le canal
- 2- Lancer la conversion
- 3- Attendre (260 microsecondes max)
- 4- Tester(ADIF)
- 5- Lire ADCL puis ADCH

C.2.3 IMPLÉMENTATION DES CORRECTEURS

Q32. Suite à la présentation de l'asservissement développé précédemment

a) Définir les structures de données nécessaires à l'implémentation de chaque correcteur.

Les variables nécessaires à implémenter dans le programme seront des variables numériques de type flottant:

b) Ecrire l'algorithme permettant d'implémenter sous forme de procédure chacun de ces correcteurs.

Données en entrée:

Données en sorties:

Constantes:

c) Ecrire l'algorithme général permettant de piloter un axe moteur à partir de la consigne N_c .

Données en entrée:

Données en sorties:

Constantes:

d) Vérifier par une méthode de traçage le bon fonctionnement de ces algorithmes.

La trace nous permet de vérifier la bonne mise à jour des variables....

C.3 EXPLOITATION PÉDAGOGIQUE

C.3.1 PRÉSENTATION DE LA COMMANDE MLI EN STI GÉNIE ÉLECTRONIQUE

Il s'agit de proposer l'étude du principe de la commande MLI et la structure d'un pont en H pour la commande en vitesse d'un moteur à courant continu dans les deux sens de rotation. On cherche également à montrer l'utilité de la mesure du courant moteur afin de détecter et d'indiquer une surcharge en couple.

Q33. Définition des séquences et documents pédagogiques

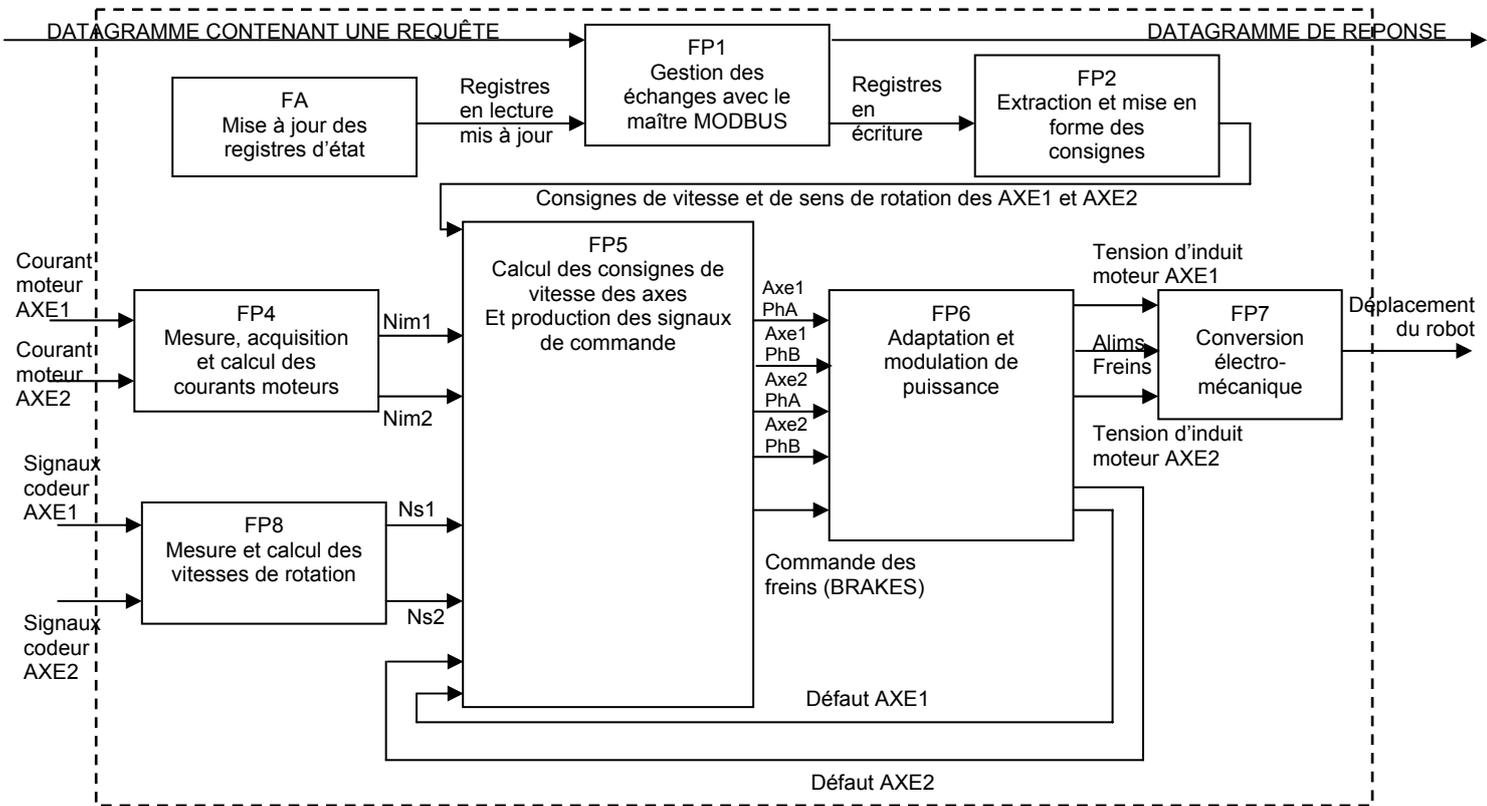
- a) *Proposer une structure de séquence pédagogique permettant d'aborder les concepts mis en œuvre sur la carte variateur pour le pilotage de la vitesse moteur au niveau choisi (on ne s'intéresse pas à l'aspect asservissement).*

Éléments de l'approche	Critères d'évaluation
Structure de la séquence	Pertinence de l'approche Progression : Méthodologie envisagée
Objectifs visés	Prérequis nécessaires : Pertinence au regard du référentiel Objectifs intermédiaires nécessaires Points associés aux disciplines connexes
Activités envisagées	Pertinence de l'activité Positionnement de l'activité dans la séquence Définition et délimitation des compétences opérationnelles et théoriques.

b) Produire un schéma fonctionnel de degré 1 de la carte variateur dans la configuration de l'acteur locomotion.

- Lisibilité du schéma,
- Simplicité du schéma,
- Qualité du schéma,
- Choix des noms des liaisons et des fonctions

Exemple de schéma fonctionnel : (l'accessibilité au registre (lecture/écriture) sont ceux vus depuis le maître MODBUS)



Q34. Développement d'une activité pratique

- a) *Proposer une mise en œuvre matérielle destinée à mettre en évidence le principe de la commande MLI pour la commande en vitesse d'une MCC. Mettre en évidence les objectifs des mesures envisagées.*

Éléments de l'approche	Critères d'évaluation
Structure de la manipulation	Pertinence de l'approche Progression : Méthodologie envisagée
Mise en œuvre matérielle	Description du matériel utilisé, Explication et définition des travaux de câblages effectués par le professeur et laissés à la charge de l'élève Intégration des contraintes temporelles dans le type de séance choisie.
Objectifs visés	Prérequis nécessaires : Pertinence au regard du référentiel Objectifs intermédiaires nécessaires Points associés aux disciplines connexes
Mesures envisagées	Pertinence des mesures Critères de validité des mesures Interprétation des résultats Pertinence de la méthode pédagogique

- b) *Expliciter le positionnement de cette activité dans la séquence proposée précédemment ainsi que les objectifs pédagogiques visés.*

Attentes du jury :

On attend une production maximale de 4 pages format A4.

Critères d'évaluation du candidat :

- L'exactitude technique des documents présentés et le respect du système proposé,
- La pertinence pédagogique des objectifs définis,
- Le respect des exigences du référentiel,
- La cohérence et la pertinence pédagogique des représentations utilisées au niveau choisi,
- La qualité des descriptions et des explications proposées (exactitude technique, précision et concision, expression écrite, adéquation par rapport au contexte).

C.3.2 IMPLÉMENTATION ET TEST D'UNE CARTE DE VARIATION DE VITESSE EN STS SYSTÈMES ELECTRONIQUES

On envisage d'exploiter pédagogiquement le système et le sous-système associés à la carte de variation de vitesse dans une section de STS Systèmes Electroniques en développant le champ d'application « **Automatique et robotique** ». On cherche à amener les étudiants à tester et valider les performances des éléments logiciels et matériels de l'électronique de contrôle du module, à partir du bus de communication, jusqu'aux performances dynamiques de l'asservissement.

On cherche à développer les compétences terminales suivantes :

- T2 : établir les procédures de test sur une maquette.
- M3 : détecter le (ou les) composants ou le (ou les) constituants défectueux.

Q35. Définition de la configuration matérielle

a) *Définir et proposer une configuration pédagogique matérielle permettant de tester et valider les performances de la carte.*

Éléments de l'approche	Critères d'évaluation
Définition du banc de test	Clarté : Définition des grandeurs prélevées et justification des points de mesures Définition ou présentation du banc de test
Objectifs pédagogiques	Définition de l'approche Délimitation de l'analyse Compétences opérationnelles développées Définition des tâches élèves
Critères de performances et de validité de la carte	Justification de la démarche, Définition des critères de validité Types de tests envisagés (comportementaux, dynamiques, statiques...)

b) *Définir la méthodologie envisagée pour réaliser les tests de l'asservissement de vitesse.*

Éléments de l'approche	Critères d'évaluation
Méthodologie	Clarté, Justification des séquences d'opération au regard des modèles comportementaux Contraintes matérielles , exploitation du support

Q36. Production des documents pédagogiques

a) *Proposer un document pédagogique précisant aux étudiants les étapes de tests et les critères de validation du fonctionnement de la carte.*

Éléments de l'approche	Critères d'évaluation
Forme du document	Clarté : Informations techniques ou documents de références si besoin
Définition des séquences de tests	Délimitation des tâches Définition des conditions matérielles nécessaires à la mesure Justification ou objectifs de la mesure au regard des performances souhaitées
Explicitation des critères de validation	Justification de la démarche, Définition des critères de validité Opération à effectuer dans un cas d'invalidité de la fonction testée.

b) Elaborer une stratégie pédagogique permettant d'amener les étudiants à proposer une configuration industrielle de test de la carte.

Éléments de l'approche	Critères d'évaluation
Stratégie	Clarté : Pertinence de la démarche
Critères retenus pour caractériser la configuration industrielle de la carte	Critères et contraintes industrielles envisagées (coût, temps de test, ...) Choix des solutions techniques Solutions envisagées pour sensibiliser les étudiants Approche des méthodologies de mesures adaptées
Faisabilité	Analyse des contraintes

Critères d'évaluation du candidat :

- La pertinence des solutions matérielles envisagées,
- La cohérence des stratégies pédagogiques développées,
- Le respect des exigences du référentiel,
- La qualité des descriptions et des explications proposées (exactitude technique, précision et concision, expression écrite, adéquation par rapport au contexte).

Compte-rendu de jury de l'épreuve d'électronique et informatique industrielle.

Le thème retenu est un robot d'intervention en milieu hostile.

Le sujet est constitué de 3 parties indépendantes, A, B et C. Chaque partie comprend une partie d'exploitation pédagogique.

La partie A est à dominante informatique industrielle et s'intéresse à l'architecture générale.

La partie B est orientée sur l'analyse structurelle de la liaison numérique HF.

La partie C aborde la commande des moteurs à courant continu par MLI avec asservissement numérique de vitesse.

Le sujet couvre un large champ technologique qui permet au candidat, quelque soit sa sensibilité, de s'exprimer.

Partie A :

Pourcentage des candidats qui ont abordé cette partie : 67%

Pourcentage des candidats qui ont une moyenne supérieure au groupe : 38%

Pourcentage des candidats qui ont abordé la partie pédagogique: 21%

Le traitement de cette partie fait apparaître les points suivants :

L'outil de modélisation et de communication UML commence à être connu et compris. Cependant le rôle respectif des différents diagrammes n'est pas encore maîtrisé.

La notion de méthode de développement est très peu appréhendée.

La production de modèles par les candidats est très mauvaise.

La gestion des interruptions est très mal maîtrisée : les candidats ne doivent pas oublier qu'une application nécessite souvent un « Noyau Temps Réel » ou un « système d'exploitation » qui prend en charge la gestion mémoire, l'exécution des tâches, les communications inter tâches, la gestion des interruptions et les butées temporelles. Cette notion doit être abordée dans la formation.

Modbus est connu, bien que le rôle du CRC soit moins maîtrisé surtout son implication dans la correction des erreurs.

L'écriture en langage formel est très aléatoire et devrait faire référence à une « grammaire formelle » et une syntaxe précise.

Partie B :

Pourcentage des candidats qui ont abordé cette partie : 81%

Pourcentage des candidats qui ont une moyenne supérieure au groupe: 44%

Pourcentage des candidats qui ont abordé la partie pédagogique : 24%

La partie B reste celle la plus traitée par l'ensemble des candidats.

Parties B1 & B2

Les candidats hésitent à commencer des calculs un peu longs et préfèrent traiter les questions plus qualitatives. Malgré tout, trop de candidats ignorent ou maîtrisent mal les fondamentaux de transmission de données numériques (half-duplex, modulation de fréquence, mesures HF, théorèmes généraux).

Les structures de base de l'électronique analogique sont mal maîtrisées (oscillateurs, PLL, schémas équivalent petits signaux).

Seuls quelques rares candidats ont traité les questions relatives au traitement du signal.

Partie B3

Environ 1/4 des candidats a abordé cette partie. La majorité a su dégager l'architecture fonctionnelle d'un récepteur de type hétérodyne à double changement de fréquence. Toutefois, il est dommage que les candidats n'aient su expliquer correctement son intérêt et quantifier les fréquences utilisées.

Peu de candidats ont su mettre correctement en évidence le principe utilisé dans la conversion fréquence tension (discriminateur de fréquence) bien que celui-ci soit très couramment utilisé dans diverses applications..

Partie B4

Certains candidats ont proposé une description générale sans liaison avec le système étudié. Ce non respect du sujet a été sévèrement sanctionné.

D'autre part, beaucoup trop de candidats se contentent de déclarer des intentions. Sans une analyse technique suffisante, le niveau de l'application pédagogique proposé n'a pas été en adéquation avec le référentiel du BTS SE. Il est conseillé au candidat de préciser de manière concrète les contenus ou concepts à aborder dans la séquence. De même le jury n'attend pas une recopie des parties du référentiel, mais une mise en relation et une description précise des contenus.

Au cours de cette séquence, les savoirs principaux devaient être extraits de S04 (Transmission et transport de l'information). Un certain nombre de candidats ont proposé des applications centrées sur la programmation de microcontrôleur (savoirs S03 'traitement numérique de l'information) ou l'étude et la conception de structure à base de PLL type 4046. Ces hors sujet ont été sanctionnés.

Les candidats qui ont proposé des illustrations pertinentes avec des schémas, des questions et les réponses attendues des élèves ont eu de bons résultats.

Partie C :

Pourcentage des candidats qui ont abordé cette partie: 70%

Pourcentage des candidats qui ont une moyenne supérieure au groupe : 44%

Pourcentage des candidats qui ont abordé la partie pédagogique: 35%

Bien que cette partie figure à la fin du sujet, elle a été traitée par une majorité de candidats qui semblent être attirés par les structures numériques classiques mises en œuvre. Paradoxalement, les candidats ont des difficultés avec les filtres et correcteurs numériques qui sont pourtant couramment utilisés.

Partie C2

Il est à remarquer que les questions 30 à 32 pouvaient parfaitement convenir à des électroniciens et informaticiens, elles ont pourtant été très peu et très mal traitées.

La faible complexité du microcontrôleur laissait espérer de nombreuses réponses.

On aurait aussi pu attendre une plus forte implication dans la programmation du correcteur numérique, c'est dommage.

Peut-être que le sujet n'a pas été lu jusqu'au bout.

Partie C3

Les questions Q33 et Q34 ont été traitées par une majorité de candidats.

Bien que la structure soit souvent rencontrée dans les systèmes étudiés en bac STI, les illustrations pédagogiques ont souvent été exposées de manière superficielle sans exemple de mise en œuvre.

L'étude de la génération du signal MLI ne faisait pas partie des objectifs fixés par le sujet. De plus, les structures proposées (notamment à base d'un circuit obsolète tel le 555) étaient souvent inadaptées dans ce contexte.

Les candidats qui ont proposé des illustrations pertinentes avec des schémas, des questions et les réponses attendues des élèves ont obtenu de bons résultats.

Partie C4

Très peu de candidats ont abordé les questions Q35 et Q36. D'autre part, le niveau et les contenus des applications pédagogiques proposées n'étaient pas conformes aux attendus du BTS SE et aux objectifs fixés dans le sujet.

Toutes les parties :

Trop souvent, la présentation des copies et l'expression écrite ne sont pas admissibles. Un certain nombre de candidats ne numérote pas les questions, ne met pas en évidence leurs résultats, oublie les unités, etc.

AGRÉGATION

SESSION 2006

CONCOURS INTERNE

Section : GÉNIE ÉLECTRIQUE

Option B : ÉLECTROTECHNIQUE ET ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE

ÉTUDE D'UN SYSTÈME INDUSTRIEL

DURÉE : 8 HEURES, COEFFICIENT : 1

Aucun document n'est autorisé.

*Calculatrice autorisée (conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999)
Convertisseur en Euro autorisé*

ALIMENTATION EN EAU POTABLE

Ce sujet comporte 3 dossiers distincts :

📁 Dossier de présentation, texte du sujet avec le travail demandé	16 pages
📁 Documents réponses N°1 à 5	5 pages
📁 Documents annexes	9 pages

Ce sujet comporte trois parties indépendantes :

- Partie **A** : Étude du fonctionnement de la station (barème indicatif 100 points sur 200).
- Partie **B** : Étude de l'alimentation électrique de la station (barème indicatif 70 points sur 200).
- Partie **C** : Planification des travaux de modification (barème indicatif 30 points sur 200).

Une lecture préalable et complète du sujet est indispensable.

Il sera tenu compte de la cohérence avec laquelle les candidats traiteront chaque partie, le jury préférant une réflexion d'ensemble de la partie abordée à un éparpillement des réponses.

Les candidats sont invités à numéroter chaque page de leur copie et à indiquer clairement le numéro de la question traitée.

Les candidats sont priés de rédiger les différentes parties du problème sur feuilles séparées et clairement repérées. Chaque question est identifiée par une police **gras** et repérées par un numéro.

Il leur est rappelé qu'ils doivent utiliser les notations propres au sujet, présenter clairement les calculs et dégager ou encadrer tous les résultats.

Tout résultat incorrectement exprimé ne sera pas pris en compte. En outre les correcteurs leur sauront gré d'écrire lisiblement et de soigner la qualité de leur copie.

Il sera tenu compte de la qualité de rédaction, en particulier pour les réponses aux questions ne nécessitant pas de calcul. Le correcteur attend des phrases complètes respectant la syntaxe de la langue française.

Pour la présentation des applications numériques, il est rappelé que lors du passage d'une forme littérale à son application numérique, il est recommandé aux candidats de procéder comme suit :

- après avoir rappelé la relation littérale, chaque grandeur est remplacée par sa valeur numérique en respectant la position qu'elle avait dans la relation puis le résultat numérique est donné sans calculs intermédiaires et sans omettre son unité.

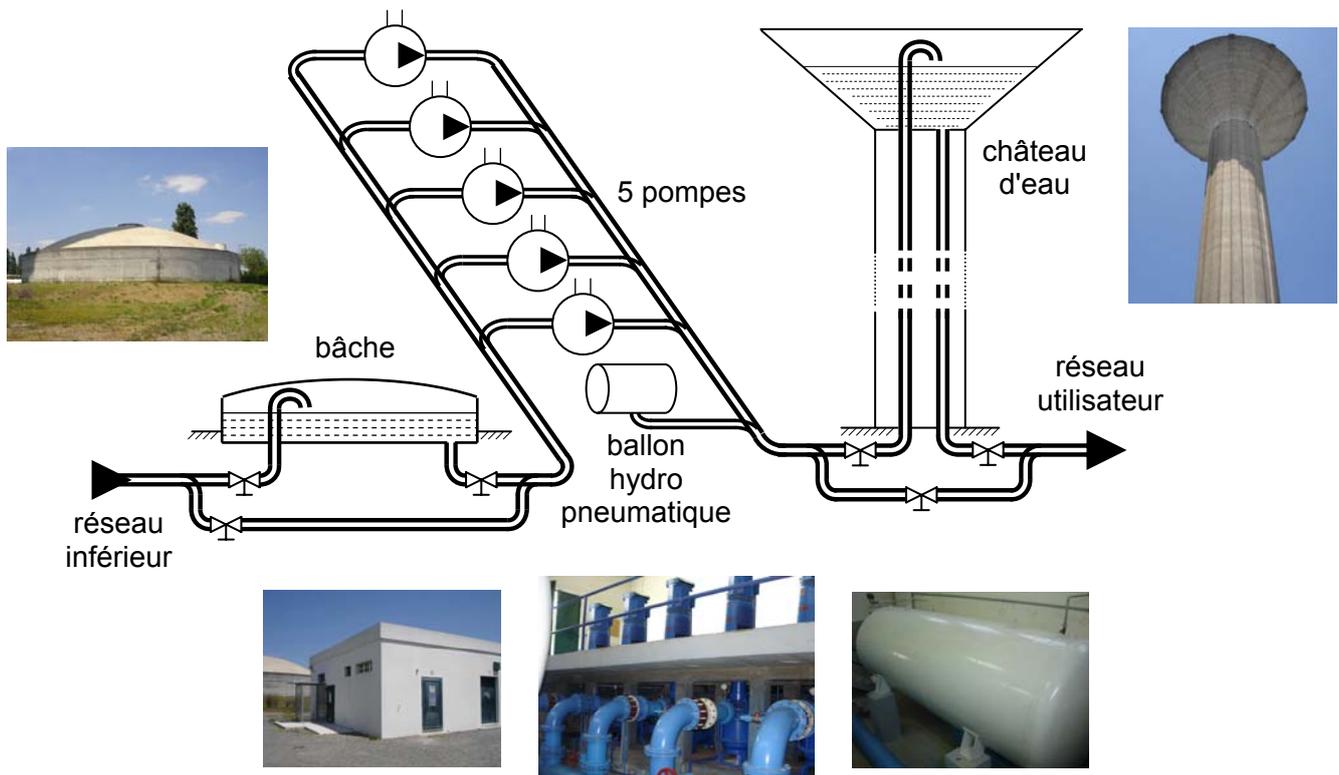
Si le texte du sujet, de ses questions ou de ses annexes, vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, il vous est demandé de la (ou les) mentionner explicitement dans votre copie.

ALIMENTATION EN EAU POTABLE

Présentation du contexte

Le terme « alimentation en eau potable » ou « adduction en eau potable » regroupe la production d'eau potable et sa distribution aux usagers. Ce sujet prend pour support l'alimentation en eau potable de l'agglomération nantaise (570 000 habitants). L'eau est pompée dans la Loire, traitée pour être rendue potable dans une usine et stockée dans divers réservoirs avant d'être distribuée aux usagers. La production moyenne de l'usine est de 110 000 m³ par jour. Les besoins domestiques des habitants représentent environ les deux tiers de cette production.

Ce sujet s'intéresse au fonctionnement d'un des châteaux d'eau qui assurent le stockage et la mise en pression de l'eau potable distribuée. Voici un croquis de l'ensemble étudié :



Le château d'eau comprend un réservoir de 3 000 m³ situé à 64 m du sol. Il est alimenté par la station de relevage située à proximité et qui comprend 5 pompes en parallèle. Actuellement, 3 pompes sont nécessaires et une permutation circulaire sur les 5 pompes est effectuée.

Ces pompes puisent dans une bâche de 3 000 m³ située au niveau du sol.

La bâche, de diamètre égal à 28 m, est remplie par le réseau inférieur, une vanne régulée y maintenant un niveau d'eau quasi constant (entre 3,84 m et 4 m).

A la sortie des pompes et quasiment à la même altitude, un ballon hydropneumatique de 15 m³ est placé en parallèle. Il assure une fonction antibélier en mode normal. Lors de l'entretien du château d'eau, ce ballon permet de maintenir la pression dans le réseau utilisateur. Ce mode est appelé surpression.

Deux compresseurs fonctionnant alternativement permettent entre autre d'assurer un niveau d'air comprimé suffisant dans le ballon.

L'ensemble est piloté par un automate programmable relié par modem à un poste de supervision distant. Ses principales informations proviennent de capteurs de niveau (« poires », sondes de niveau, capteurs analogiques) et de capteurs de pression (pressostats et transmetteurs de pression relative).

L'exploitant désire supprimer la bâche car celle-ci est trop facilement accessible pour des personnes malveillantes d'une part, et nécessite de l'entretien d'autre part.

Son service chargé des travaux confie à un groupe d'étudiants la mise en place d'un variateur de vitesse sur une des cinq pompes dans le but de valider le fonctionnement sans bache. Une fois ce fonctionnement validé, la mise en place des autres variateurs sera confiée à une entreprise.

Présentation de l'épreuve

L'épreuve est constituée de 3 parties indépendantes :

- la partie A s'intéresse au fonctionnement de la station en mettant l'accent sur une approche énergétique ;
- la partie B s'intéresse aux incidences de la mise en place de variateurs sur l'alimentation électrique de la station ;
- la partie C concerne la planification des travaux de modification.

Pour les questions de nature scientifique, l'évaluation portera, au plus haut niveau, sur la maîtrise des connaissances, la qualité du raisonnement et sur l'exactitude des résultats attendus.

Les questions de nature didactique et pédagogique auront les supports suivants :

- le projet industriel en STS électrotechnique seconde année concernant la mise en place d'un variateur de vitesse ;
 - un sous système didactique (essais de systèmes en STS électrotechnique ou TP en Terminale STI).
- L'évaluation portera alors sur la capacité des futurs professeurs agrégés à transposer les notions techniques et scientifiques à un niveau d'enseignement donné en proposant des hypothèses de travail et des illustrations adaptées au niveau de la classe concernée. Elle portera aussi sur la capacité de mise en œuvre matérielle des situations d'enseignement et la capacité à gérer le travail d'un groupe d'étudiants.

A – ÉTUDE DU FONCTIONNEMENT DE LA STATION

Pour aborder l'étude, commençons par rappeler des éléments de mécanique des fluides.

L'équation de Bernoulli nous donne l'énergie W (J) à fournir pour déplacer un fluide incompressible d'un point 1 au point 2 d'une conduite, en régime permanent :

$$W = m.g.(z_2 - z_1) + m \cdot \frac{1}{\rho} \cdot (p_2 - p_1) + \frac{1}{2} \cdot m \cdot (v_2^2 - v_1^2) + J_s + J_r$$

- m kg : masse du fluide ;
- $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$: accélération due à la pesanteur ;
- z_i m : altitude du centre de masse au point i considéré ;
- $\rho = 1\,000 \text{ kg.m}^{-3}$: masse volumique du fluide (eau potable) ;
- p_i Pa : pression au point i considéré ($1 \text{ Pa} = 10^{-5} \text{ bar}$) ;
- v_i m.s^{-1} : vitesse d'écoulement au point i considéré ;
- J_s J : pertes de charges singulières, dues aux brusques variations de section et de direction de la conduite (clapets, coudes, vannes), proportionnelles à v_i^2 ;
- J_r J : pertes de charges régulières, dues aux frottements du fluide sur la conduite, proportionnelles à v_i^2 et à la longueur de la conduite.

En divisant W par $[m.g]$, on obtient une équation en hauteur de liquide H_r (m) :

$$H_r = (z_2 - z_1) + \frac{1}{\rho.g} \cdot (p_2 - p_1) + \frac{1}{2.g} \cdot (v_2^2 - v_1^2) + j_s + j_r$$

- j_s m : pertes de charges singulières ;
- j_r m : pertes de charges régulières.

H_r caractérise le réseau hydraulique, c'est-à-dire la charge des pompes.

En introduisant le débit Q , on peut écrire $H_r = k_s + k_v \cdot Q^2$, avec Q en $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ et k_s en m.

A.1 : fonctionnement avec le château d'eau et la bêche.

Ce fonctionnement correspond à la situation initiale.

Données du problème :

- $z_2 = 90,27$ m (côte IGN, *Institut Géographique National*) ;
- $z_1 = 28,19$ m (côte IGN) correspondant au niveau moyen d'eau dans la bêche ;
- $p_2 = 1$ bar ;
- $p_1 = 1$ bar en fonctionnement avec la bêche ;
- $v_2 = 1$ m.s⁻¹ lorsque le débit est égal à 0,125 m³.s⁻¹ (450 m³.h⁻¹) ;
- $v_1 \approx 0$ en fonctionnement avec la bêche ;
- $j_s + j_r = 1,75$ m lorsque le débit est égal à 0,125 m³.s⁻¹.

Q1. Donner les valeurs numériques de k_s et de k_v .

Q2. Démontrer simplement que, pour un débit Q donné, l'expression de la puissance hydraulique s'écrit $P_h = \rho.g.H_r.Q$.

Chaque pompe centrifuge possède une caractéristique hauteur manométrique $H_{1p,n}$ (m ou mCe) fonction du débit Q (m³.h⁻¹) et de la fréquence de rotation n de son arbre d'entraînement.

Le document annexe A1 donne la courbe de cette caractéristique $H_{1p,n_0}(Q)$, pour la fréquence de rotation $n_0 = 1\,455$ tr.min⁻¹.

Cette caractéristique peut être approchée par l'équation $H_{1p,n_0} = a.Q^2 + b.Q + c$ avec $a = -14\,640$, $b = 278$, $c = 80$ et Q exprimé en m³.s⁻¹.

Le document annexe A1 donne aussi la courbe du rendement hydraulique de la pompe $\eta_{h,n_0}(Q)$, pour la fréquence de rotation n_0 .

Ce rendement peut être approché par l'équation $\eta_{h,n_0} = -421 \times (Q - Q_{RM})^2 + \eta_{hMAX}$ avec $\eta_{hMAX} = 0,8$, $Q_{RM} = 0,04361$ m³.s⁻¹ (157 m³.h⁻¹) et Q exprimé en m³.s⁻¹.

On admettra que quand plusieurs pompes fonctionnent en parallèle, les débits s'additionnent pour une hauteur donnée. Ceci est justifié par la proximité des pompes.

Q3. Tracer sur le document réponse DR1 la caractéristique de deux pompes en parallèle $H_{2p,n_0}(Q)$ puis celle de trois pompes en parallèle $H_{3p,n_0}(Q)$, et ce pour la fréquence de rotation n_0 .

Représentez les points de fonctionnement pour une pompe seule, puis pour deux et trois pompes en parallèle, et ce pour un réseau hydraulique H_r considéré constant et égal à 64 m.

Une approche algébrique peut être faite lorsque N pompes identiques sont en parallèle et que chacune débite Q/N , Q étant le débit total : $H_{Np,n_0} = a \times (Q/N)^2 + b.(Q/N) + c$

Q4. En exploitant l'équation $H_{Np,n_0}(Q)$ ainsi que l'équation du réseau $H_r = k_s + k_v.Q^2$, calculer le débit et la hauteur manométrique pour $N = 1$, $N = 2$ puis $N = 3$.

Les moteurs asynchrones entraînant les pompes ont chacun une puissance nominale $P_n = 45$ kW.

Leur rendement $\eta_M = 89,5$ % pour $P = P_n$, $\eta_M = 89,6$ % pour $P = 0,75 P_n$ et $\eta_M = 89,1$ % pour $P = 0,5 P_n$.

On considère pour la suite $H_r = 64$ m.

Q5. Calculer la puissance mécanique au niveau de chaque moteur en considérant $H_r = 64$ m.

Q6. Déduire la puissance électrique totale absorbée P_{3abs} par 3 pompes.

Le niveau d'eau dans le château est maintenu entre 87,65 m et 88,05 m le jour et entre 88,35 m et 88,85 m la nuit. Le niveau d'eau moyen de jour correspond à un volume de 1 790 m³ et le niveau moyen de nuit correspond à un volume de 2 180 m³.

On donne ci-dessous un extrait de la tarification de l'énergie électrique.

TARIF VERT A5 BASE version TLU			Prime fixe : 108,36 € / kW	
prix hors taxes de l'énergie (c € / kWh)				
HIVER			ETE (avril à octobre inclus)	
PTE	HPH	HCH	HPE	HCE
5,241	4,007	3,052	2,350	1,455
PTE : de 9 h à 11 h et de 18 h à 20 h, de décembre à février inclus				
HCH : de 22 h à 6 h et dimanche toute la journée			HCE : de 23 h à 7 h et dimanche toute la journée	

Q7. Estimer l'économie annuelle en € (hors taxes) réalisée grâce à cette procédure.

EXPLOITATION PÉDAGOGIQUE

On propose en annexe (A2 à A6) un sous système pédagogique (« *Sous-système niveau-débit* » de chez GTI Systèmes) permettant d'aborder les questions énergétiques relatives à l'adduction d'eau. La question suivante se positionne aussi bien en terminale STI qu'en première année de STS électrotechnique. A l'aide d'abaques, les pertes de charge P_{dc} du circuit hydraulique pour un débit Q₀ ont déjà été déterminées.

Q8. Proposer le mode opératoire permettant de relever la courbe de la hauteur manométrique de la pompe en fonction de son débit.

A.2 : fonctionnement avec le château d'eau mais sans bête

L'exploitant désire ne plus utiliser la bête pour limiter les opérations d'entretien et réduire les risques d'actes malveillants. L'arrivée de l'eau dans les pompes viendra alors du réseau inférieur (amont de la bête) dont la pression peut varier entre 2 et 3 bar au dessus de la pression atmosphérique.

On négligera l'effet des pertes de charge j_s et j_r.

Données du problème :

- z₂ = 90,27 m (côte IGN) ;
- z₁ = 23,65 m (côte IGN) ;
- p₂ = 1 bar (pression atmosphérique) ;
- p₁ = 3 à 4 bars ;
- v₂ = v₁.

Q9. Donner la valeur numérique de H_r lorsque p₁ = 4 bar. Déduire le débit et le rendement d'une pompe.

L'exploitant désire conserver l'automatisme du château d'eau. Pour cela, chaque pompe en fonctionnement doit avoir un débit égal à 157 m³.h⁻¹ (Q_{RM}).

Chaque pompe sera commandée par un variateur de vitesse distinct.

Une pompe en vitesse variable obéit au principe suivant :

- soit X = n / n₀ avec n la fréquence de rotation et n₀ = 1 455 tr.min⁻¹ ;
- un point (Q₀, H₀) de la caractéristique de la pompe à la fréquence n₀ devient un point (X.Q₀, X².H₀) à la fréquence n = X.n₀ ;
- lorsque X varie, le point (X.Q₀, X².H₀) se déplace le long d'une parabole passant par l'origine d'équation β.Q² (β = H₀ / Q₀²) ;
- (Q₀, H₀) et (X.Q₀, X².H₀) ont le même rendement (hypothèse valable lorsque X > 2 / 3).

Le document réponse DR1 montre la caractéristique H_{1p,n} (Q) d'une pompe lorsque X = 0,9.

**Q10. Tracer sur ce graphique du document réponse DR1 la caractéristique $H_{1p,n}(Q)$ d'une pompe pour avoir un débit de $157 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, lorsque $p_1 = 4 \text{ bar}$.
En déduire la fréquence de rotation n .**

**Q11. Montrer que la caractéristique $H_{1p,n}(Q)$ de la pompe à la fréquence de rotation n s'écrit :
 $H_{1p,n} = a.Q^2 + b.Q.X + c.X^2$**

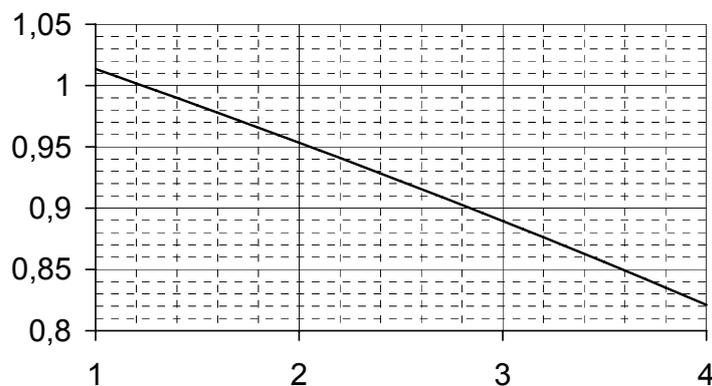
Le pilotage du dispositif dans ce mode de fonctionnement se fera en donnant au variateur une consigne de vitesse fonction de l'information de pression amont p_1 .

Q12. Donner l'expression de X en fonction de p_1 .

EXPLOITATION PÉDAGOGIQUE

Dans le cadre du projet industriel présenté en introduction, les étudiants doivent gérer la commande des variateurs.

On leur donne le tracé de X en fonction de p_1 (issu d'un tableur) :



Cette courbe s'apparente fortement à une droite.

Un capteur de pression relié à une entrée analogique (E1) de l'automate mesure la pression relative amont $(p_1 - 1)$. La correspondance numérique est la suivante :

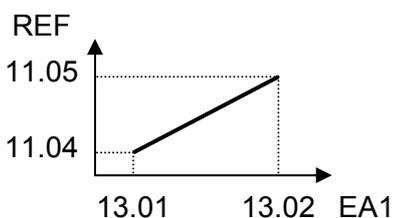
$E_1 = 0$ pour $(p_1 - 1) = 0 \text{ bar}$ et $E_1 = 10\,000$ pour $(p_1 - 1) = 10 \text{ bar}$.

Chaque variateur de vitesse reçoit sa consigne fréquence de rotation (EA1) d'une sortie analogique de l'automate. S_i est la valeur numérique associée à une des sorties analogiques de l'automate.

Une première option consiste à réaliser le traitement numérique par l'automate, chaque variateur étant paramétré comme suit : $0 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$ lorsque $S_i = 0$ (4 mA), $1\,500 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$ lorsque $S_i = 10\,000$ (20 mA).

Q13. Proposer le traitement numérique que doit réaliser l'automate et le paramétrage de chaque variateur pour la première option. Faites apparaître les difficultés de mise en œuvre de ce traitement.

La seconde option consiste à exploiter les paramètres suivants de chaque variateur (avec $S_i = E_1$) :



- 13.01 : valeur minimale du signal d'entrée (EA1) correspondant à la valeur de référence vitesse (REF) mini paramétrée en 11.04 ;
- 13.02 : valeur maximale du signal d'entrée (EA1) correspondant à la valeur de référence vitesse (REF) maxi paramétrée en 11.05 ;
- Si 13.05 = OUI, 13.01 correspondra à 11.05 et 13.02 à 11.04 ;
- Si 13.05 = NON, 13.01 correspondra à 11.04 et 13.02 à 11.05 ;
- Plage de variation de 13.01 et 13.02 : 4 à 20 mA ou 0 à +10 V ;
- Plage de variation de 11.04 et 11.05 : 0 à $18\,000 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$.

Q14. Proposer ensuite le paramétrage de chaque variateur et le traitement numérique que doit réaliser l'automate pour la seconde option.

On désire connaître les économies réalisables en variation de vitesse.

L'étude va être menée avec $p_1 = 3,7$ bar, valeur généralement constatée par l'exploitant.

L'été (avril à octobre inclus), 3 pompes sont nécessaires et l'hiver 2 pompes suffisent.

L'étude économique va être faite en supposant un débit utilisateur en aval du château d'eau $Q_u = 3.Q_{RM}$ l'été et $Q_u = 2.Q_{RM}$ l'hiver, et ce aux heures du jour. La nuit (aux heures creuses) on suppose que Q_u est 5 fois plus petit que durant la journée.

Q15. Quel est le débit Q d'une pompe si on n'utilise pas de variateur de vitesse ? Calculer ensuite la puissance électrique absorbée P_{1abs} par cette pompe en fonctionnement.

Q16. Déduire la puissance électrique moyenne $P_{1abs,MOY}$ absorbée par cette pompe.

On montre que le rendement hydraulique en vitesse variable devient :

$$\eta_{h,n} = - 421 \times [(Q / X) - Q_{RM}]^2 + \eta_{hMAX}$$

avec $\eta_{hMAX} = 0,8$, $Q_{RM} = 0,04361 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ($157 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) et Q exprimé en $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Voici un extrait de la documentation constructeur donnant le rendement de chaque ensemble moteur variateur en fonction de la fréquence d'alimentation du moteur et de la charge du moteur :

AC Drive + Motor Typical Efficiency [%]												
		Load Torque [%]										
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Frequency [Hz]	40,0	0,0	67,7	76,8	80,3	82,2	83,3	84,0	84,6	84,9	85,2	85,4
	42,5	0,0	68,0	77,1	80,6	82,4	83,5	84,2	84,8	85,1	85,4	85,6
	45,0	0,0	68,3	77,3	80,8	82,6	83,7	84,4	84,9	85,3	85,6	85,8
	47,5	0,0	68,6	77,5	81,0	82,8	83,9	84,6	85,1	85,5	85,7	85,9
	50,0	0,0	68,9	77,7	81,2	83,0	84,0	84,7	85,2	85,6	85,9	86,1

Avec le variateur de vitesse, le débit d'une pompe sera égal à Q_{RM} .

Les calculs donnent $H_r = 39,1$ m et $X = 0,842$.

Q17. Déterminer la puissance moteur, le couple moteur et le pourcentage de charge en couple du moteur.

Q18. Calculer la fréquence d'alimentation du moteur.

Q19. Déduire le rendement de l'ensemble moteur variateur et la puissance électrique absorbée P_{1abs} .

Q20. Déduire le gain en puissance moyenne absorbée par une pompe et calculer ensuite l'économie annuelle réalisée sur le prix hors taxes de l'énergie.

Q21. Calculer l'économie annuelle réalisée en tenant compte de la baisse possible de la prime fixe.

On désire enfin connaître les économies d'énergie réalisables en remplaçant les moteurs existants par des moteurs de classe de rendement EFF1. Le rendement est supérieur de 5 % à celui des moteurs actuels.

Q22. Calculer l'économie annuelle réalisable (en € hors taxes) avec la variation de vitesse associée à de tels moteurs.

Une autre solution pour augmenter le rendement consiste à faire systématiquement travailler les pompes à leur rendement maximal η_{MAX} . Le point de fonctionnement doit alors se déplacer sur une parabole $H = \beta \cdot Q^2$ passant par $[0, 0]$ et $[Q_{RM}, H_{1p,0}(Q_{RM})]$, c'est-à-dire par $[157 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}, 64 \text{ m}]$.

Q23. Expliquer les traitements à réaliser pour commander les variateurs de vitesse.

EXPLOITATION PÉDAGOGIQUE

Les deux questions suivantes se positionnent aussi bien en terminale STI qu'en première année de STS électrotechnique.

Q24. Proposer le mode opératoire et les appareils de mesure nécessaires pour relever :
- la hauteur manométrique de la pompe en fonction du débit à vitesse variable ;
- le rendement de l'ensemble {variateur, moteur, pompe} en vitesse variable.

Q25. Comment peut-on mesurer séparément le rendement de la pompe de celui de l'ensemble {moteur, variateur} ?

A.3 : fonctionnement en mode surpression avec bête

Le château d'eau n'est pas utilisé dans ce mode, ce qui permet son entretien.

Le fonctionnement de la station s'adapte au débit demandé par l'utilisateur.

Dans la situation avec bête, les pompes sont à vitesse fixe. Elles ne peuvent pas fournir une pression constante avec un débit variable. Elles fonctionnent dans une fourchette de pression.

Le débit appelé par le réseau Q_u n'est en général pas égal au débit Q refoulé par les pompes.

Lorsque $Q > Q_u$, l'excédent de pompage est refoulé dans le ballon hydropneumatique qui se remplit en entraînant une augmentation de la pression. Quand la pression maxi P_{max} est atteinte, on retranche une pompe, ce qui rend le débit de pompage inférieur à celui du réseau.

Lorsque $Q < Q_u$, le déficit de pompage est fourni par le ballon hydropneumatique qui se vide en entraînant une diminution de la pression. Quand la pression mini P_{min} est atteinte, on ajoute une pompe, ce qui rend le débit de pompage supérieur à celui du réseau.

Les pressions mini et maxi déterminent des niveaux d'eau dans le ballon et donc un certain volume de marnage appelé réserve utile RU. Ce volume permet de calculer la fréquence de démarrage des pompes.

Dans ce mode de fonctionnement, le débit de chaque pompe en fonctionnement varie lorsque la pression varie. Le débit utilisateur subit aussi une variation lorsque la pression varie.

Une approche généralement utilisée consiste à supposer un débit constant de la pompe égal à sa valeur moyenne, soit $Q = 147 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, et à considérer un débit utilisateur $Q_u = \alpha \times Q$ avec $\alpha \in [0, 1]$.

On appelle t_{on} le temps de fonctionnement et t_{off} le temps d'arrêt de la pompe.

$T = t_{on} + t_{off}$ représente la durée séparant deux démarrages de pompe.

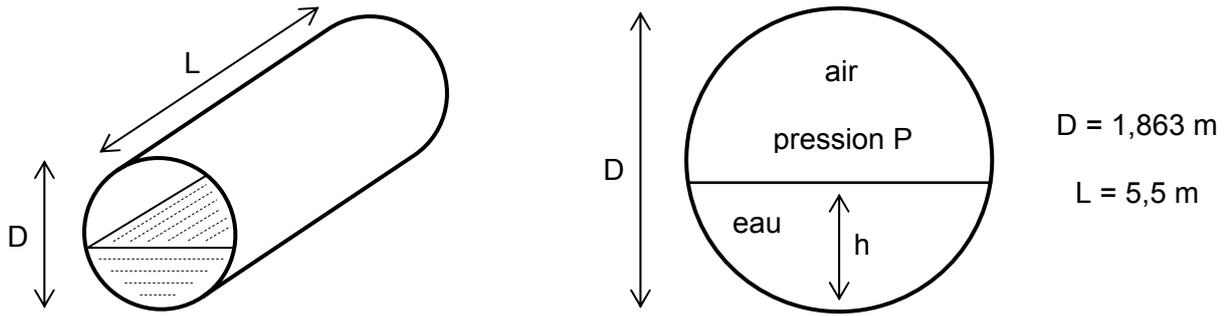
L'étude va être simplifiée en supposant l'utilisation d'une seule pompe (débit $Q_u \leq 147 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$).

Q26. Exprimer t_{on} et t_{off} en fonction de Q , RU et α .

Q27. Déterminer la valeur minimale T_{min} de T en fonction de Q et RU.

En fait, deux sondes de niveau RN1 et RN2 sont utilisées pour enclencher ou déclencher les pompes : RN1 détecte le niveau bas h_1 correspondant à P_1 , RN2 détecte le niveau haut h_2 correspondant à P_2 .

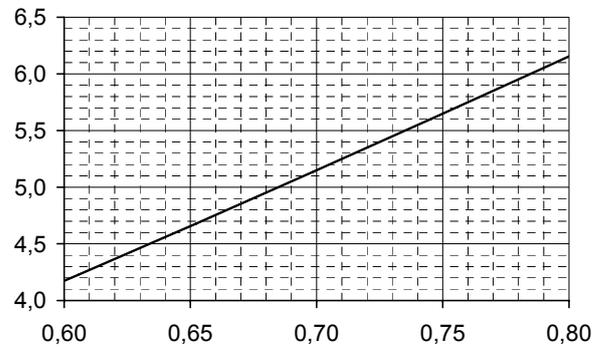
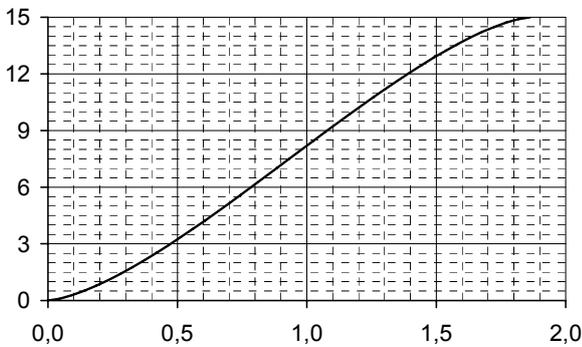
On désigne par V_e le volume d'eau et V_a le volume d'air dans le ballon hydropneumatique dont voici le croquis :



On désigne par R le rayon du cylindre.

Q28. Exprimer le volume d'eau V_e en fonction de h , L et R .

L'utilisation d'un tableur donne les courbes V_e (m^3) en fonction de h (m) suivantes : (la courbe de droite est un agrandissement de celle de gauche)



Q29. Relever le volume V_{e1} pour $h = h_1 = 63,4$ cm, puis V_{e2} pour $h = h_2 = 76,5$ cm. Déduire le nombre maximal de démarrages par heure si une seule pompe est utilisée, puis si on tient compte de la permutation circulaire des 5 pompes. Conclusion.

Lorsque $h = h_2$, la pression $P = P_{max} = 8,2$ bar (7,2 bar au dessus de la pression atmosphérique). On rappelle qu'à température constante, V_a est inversement proportionnel à P (Loi de Boyle-Mariotte).

Q30. Calculer la pression P_{min} .

EXPLOITATION PÉDAGOGIQUE

Dans le cadre des essais de systèmes en STS électrotechnique, on désire montrer le lien entre le niveau d'eau et la pression dans le ballon. Celui du sous-système, de capacité égale à 150 l, cylindrique de section constante, est posé verticalement. Une règle graduée en % permet de visualiser le niveau ou le volume d'eau dans le ballon : $N = 0\%$ lorsque le volume d'eau $V_e = 50$ l et $N = 100\%$ lorsque le volume d'eau $V_e = 130$ l. La valeur P_r délivrée par le capteur de pression est la différence entre la pression P dans le ballon et la pression atmosphérique (1 bar).

Q31. Montrer que $P_r = [100 + 0,8 \times N] / [100 - 0,8 \times N]$ si $P_r = 1$ bar lorsque $N = 0\%$.

Q32. Proposer le mode opératoire (réglages, états des commutateurs, des vannes,...) pour simuler sur le sous-système un château d'eau dont le niveau d'eau est régulé à une altitude de 20 m.

Q33. Proposer les modifications sur le sous système pour simuler un fonctionnement en mode surpression (sans château d'eau) asservi en pression.

A.4 : fonctionnement en mode surpression sans bête

Dans ce mode, chaque pompe est commandée par un variateur de vitesse distinct.
 On utilise un capteur de pression en aval des pompes et du ballon hydropneumatique.
 La pression sera ainsi maintenue constante, le ballon conservant une fonction anti-bélier.
 Une électrovanne permet d'injecter de l'air comprimé dans le ballon si nécessaire.

EXPLOITATION PÉDAGOGIQUE

Dans le cadre du projet industriel présenté en introduction, les étudiants doivent aussi gérer la commande des variateurs dans ce mode de fonctionnement. Les détecteurs de niveau RN1 et RN2 vont être utilisés pour gérer l'admission d'air comprimé dans le ballon.

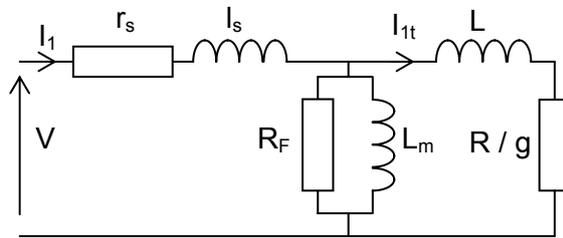
Q34. Donner le schéma fonctionnel de l'asservissement de pression.

Q35. Expliquer le principe de la gestion de l'admission d'air comprimé.

Dans le cadre d'une synthèse d'essais de systèmes, on désire justifier l'évolution du rendement d'un moteur associé à un variateur lorsque la vitesse varie.

Pour simplifier l'étude, on suppose une commande de type $(V / f) = K = \text{constant}$.

On propose d'utiliser le schéma équivalent pour une phase du moteur asynchrone suivant :



Q36. Quels sont les éléments affectant le rendement du moteur asynchrone et quel type de perte représente chacun de ces éléments ?

Dans la plage d'utilisation du moteur, le glissement g est faible ($< 5\%$).

On appelle Ω la vitesse de rotation (rad.s^{-1}), ω la pulsation du fondamental de la tension d'alimentation du moteur ($\omega = 2\pi f$) et p le nombre de paires de pôles.

Q37. En négligeant r_s et l_s et pour g faible, donner l'expression du couple électromagnétique C_{em} en fonction de $[(\omega / p) - \Omega]$.

Q38. Tracer l'allure de C_{em} en fonction de Ω , pour $f = 50 \text{ Hz}$ puis pour $f = 40 \text{ Hz}$, et ce pour g faible. Représenter les pertes Joule rotoriques sur ce tracé.

Q39. Montrer alors que, pour C_{em} donné, les pertes Joule au rotor dégradent le rendement quand ω décroît.

Q40. Comment évoluent les autres pertes du moteur quand ω décroît ?

B – ÉTUDE DE L'ALIMENTATION ÉLECTRIQUE DE LA STATION

Nous allons nous intéresser à l'incidence des variateurs de vitesse sur l'installation.

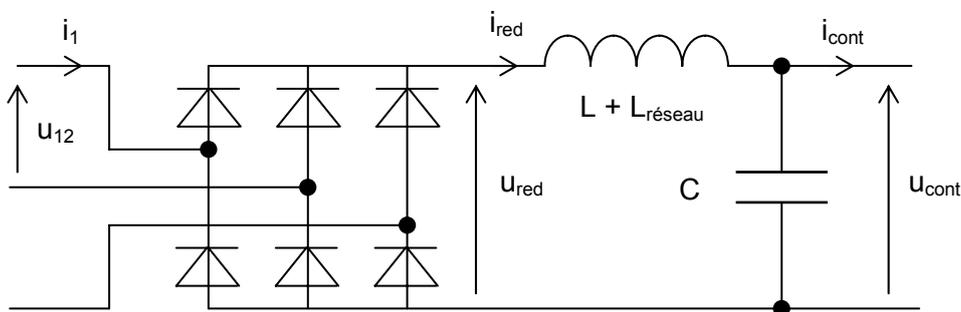
Les variateurs de vitesse proposés ont une structure de puissance classique : redressement hexaphasé par pont de diodes PD3, filtrage par condensateur suivi d'un onduleur à modulation de largeur d'impulsion. Une inductance triphasée de 330 μH , placée en amont du redresseur, est fournie avec chaque variateur. Cette inductance permet de limiter les courants harmoniques ainsi que la valeur crête du courant absorbé par le variateur.

B.1 : analyse du courant en amont du variateur

Pour dimensionner les éléments en amont du variateur, il est important de connaître l'amplitude crête et les harmoniques du courant en amont de celui-ci.

On va analyser l'influence de l'inductance L sur ce courant.

Par souci de simplification didactique, nous allons adopter le schéma suivant :



Le courant i_1 a la même allure si on remplace $(L + L_{\text{réseau}})$ par une inductance triphasée placée en amont. La puissance côté continu P_{cont} sera prise égale à 30 kW.

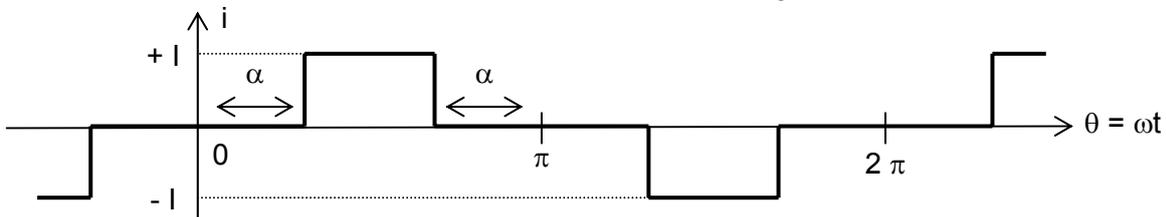
En supposant L suffisamment élevée de telle sorte que l'ondulation de i_{red} soit négligeable :

Q41. Tracer sur le document réponse DR2 les formes d'onde de u_{red} et i_1 ;

Q42. Déterminer la valeur crête \hat{I}_1 du courant i_1 ;

Q43. Déterminer les valeurs efficaces du fondamental et des harmoniques du courant i_1 , et ce jusqu'au rang 13 inclus.

On rappelle à cet effet la décomposition en série de Fourier du signal suivant :



$$i(t) = \sum_{k=0}^{k=\infty} \frac{4 \cdot I}{\pi} \cdot \frac{\cos((2.k + 1).\alpha)}{2.k + 1} \cdot \sin((2.k + 1).\omega.t)$$

En l'absence d'inductance L (seule subsiste la réactance du réseau amont), on observe une conduction interrompue du pont redresseur. Le document réponse DR2 montre une partie de la forme d'onde de i_{red} . La valeur de l'amplitude crête de ce courant est égale à 154 A.

Q44. Compléter sur le document réponse DR2 la forme d'onde de i_{red} et tracer celle de i_1 .

Pour estimer le niveau des harmoniques, on propose de modéliser la forme d'onde de i_{red} par un signal rectangulaire dont chaque rectangle a une hauteur appelée $\hat{I}_{1,mod}$ et une largeur de 26° (une période du réseau valant 360°).

Q45. Estimer la valeur $\hat{I}_{1,mod}$ sachant que la valeur moyenne de la tension u_{cont} est égale à 550 V.

Q46. Déterminer les valeurs efficaces du fondamental et des harmoniques du courant i_1 lorsque i_{red} est approximé par ce signal rectangulaire, et ce jusqu'au rang 13 inclus.

Q47. Conclure sur les incidences au niveau des contacteurs et du transformateur dont la puissance apparente est égale à 315 kVA.

B.2 : incidence sur les condensateurs de relèvement du facteur de puissance.

Dans un premier temps, nous allons déterminer la puissance réactive Q_C de la batterie de condensateurs permettant de compenser l'énergie réactive.

Le transformateur possède les caractéristiques suivantes ;

- $S_N = 315$ kVA
- À vide : $P_0 = 0,77$ kW et $Q_0 = 6,3$ kVAR
- En charge, pertes cuivre $P_{cu} = 4,1 \times (S / S_N)^2$ en kW et $Q_T = Q_0 + 12,1 \times (S / S_N)^2$ en kVAR, avec S la puissance apparente transitée.

En vitesse fixe (avec château d'eau et bêche), on suppose que la charge est composée de 3 moteurs absorbant 40 kW chacun sous un $\cos\varphi = 0,87$.

En vitesse variable (avec château d'eau mais sans bêche), on suppose le cas le plus défavorable : 3 moteurs et $p_1 = 3$ bar ; dans ce cas, les calculs donnent une puissance absorbée en amont de chaque variateur égale à 30 kW avec un $\cos\varphi = 0,98$ et un facteur de puissance $F_p = 0,859$.

Q48. Déterminer la puissance réactive totale Q_{VF} en vitesse fixe. Déduire la valeur de Q_C à installer pour obtenir $\tan\varphi = 0,4$.

Q49. Déterminer la puissance réactive totale Q_{VV} en vitesse variable. Montrer alors que $\tan\varphi < 0,4$.

EXPLOITATION PÉDAGOGIQUE

Dans le cadre du projet industriel, l'implantation d'un variateur provoquera des soucis pour la batterie de condensateurs en place. Celle-ci est du type standard et sa valeur est égale à 30 kVAR.

Les courants harmoniques générés par le variateur vont circuler dans les condensateurs, amplifiés par un effet de résonance avec la réactance du réseau amont.

Nous proposons pour les étudiants l'utilisation d'un logiciel de simulation (« *PSIM* » de POWERSYS par exemple) pour analyser ces phénomènes.

Deux cas vont être étudiés :

- premier cas : un variateur en fonctionnement et $Q_C = 30$ kVAR ;
- second cas : un variateur en fonctionnement et une batterie de condensateurs intégrant une self antiharmonique.

Premier cas :

Le schéma de simulation est proposé en annexe A7.

L'élément réseau représente la somme de l'impédance du réseau en amont du transformateur ramené au secondaire de celui-ci, l'impédance du transformateur lui-même et l'impédance de la liaison triphasée (câbles monoconducteurs) reliant le transformateur au jeu de barres. La batterie de condensateurs (C_{comp}) est câblée au niveau du jeu de barres.

Voici les caractéristiques du réseau jusqu'au jeu de barres :

- résistance en amont du transformateur ramené au secondaire : $R_Q = 0,035 \text{ m}\Omega$;
- réactance en amont du transformateur ramené au secondaire : $X_Q = 0,35 \text{ m}\Omega$;
- tension de court-circuit $u_{kr} = 4 \%$;
- câbles entre transformateur et jeu de barres : section = 185 mm^2 , longueur = 15 m , résistivité = $23,69 \text{ m}\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$, réactance = $0,09 \text{ m}\Omega \cdot \text{m}^{-1}$.

Pour déterminer la résistance R_T et la réactance X_T du transformateur, on utilise les formules de la norme UTE C 15-500 :

$$R_T = 0,31 \times Z_T \text{ et } X_T = 0,95 \times Z_T \text{ avec } Z_T = [u_{kr} / 100] \times [(420)^2 / S_N]$$

Q50. Déterminer la résistance R_R et l'inductance L_R du réseau.

Q51. Déterminer la valeur de C_{comp} .

Q52. Donner un ordre de grandeur de la valeur du générateur de courant I_{dc} modélisant le courant absorbé par l'onduleur du variateur.

Les résultats de la simulation sont présentés en annexes A7 et A8.
L'ordonnée du spectre est en valeur crête.

Q53. Établir le schéma équivalent à la fréquence du réseau et justifier l'amplitude de la composante fondamentale du courant I_{comp} .

Q54. Établir le schéma équivalent pour les fréquences multiples du réseau.

Q55. Montrer que $I_{comp} = I_{1h} \times [1 / 1 - (1 / L_R \cdot C_{comp} \times h^2 \times \omega^2)]$ avec $\omega = 2 \times \pi \times 50$.

Q56. Justifier l'amplitude des harmoniques du courant I_{comp} et calculer la valeur efficace de I_{comp} .

Q57. Justifier la forme d'onde de I_{comp} .

Q58. Conclure sur les contraintes subies par les condensateurs de compensation.

Second cas :

En vitesse variable, l'exploitant désire néanmoins compenser le $\cos\phi$ pour diminuer la puissance active. Le choix s'est porté sur un modèle intégrant une self en série avec chaque condensateur. La fréquence de résonance de cette self avec le condensateur en série avec elle est égale à 135 Hz . La puissance réactive totale de la batterie est égale à $12,5 \text{ kVAR}$. Le schéma de simulation est proposé en annexe A9.

Q59. Déterminer la valeur de C_{comp} et de L_{ah} .

Q60. Conclure en analysant les résultats de la simulation présentés en annexe A9.

Q61. Citer d'autres solutions technologiques permettant de réduire ces harmoniques.

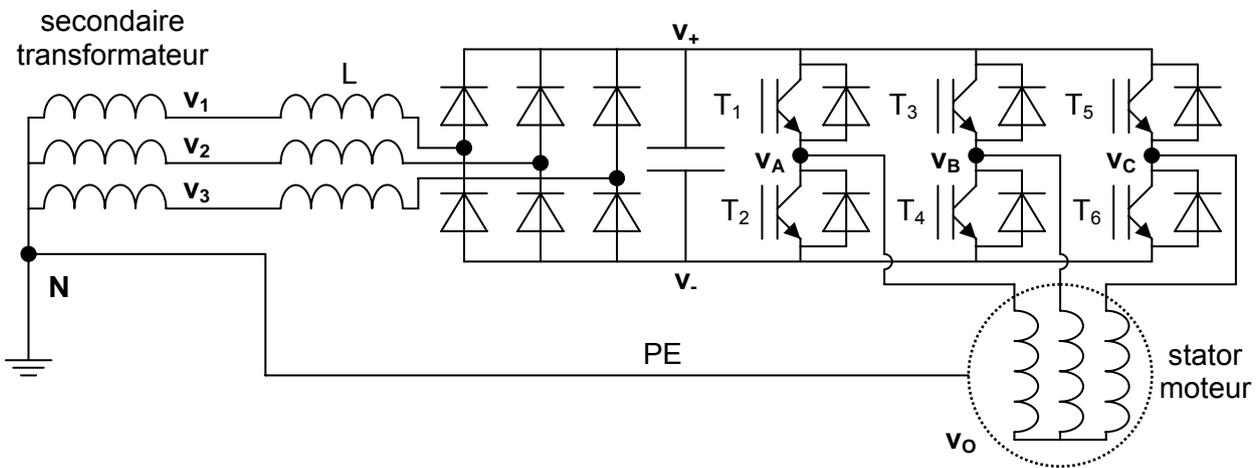
B.3 : analyse des courants haute fréquence dans l'installation

Les variateurs électroniques de vitesse modernes délivrent en sortie des impulsions de tension à fronts très raides. Des courants impulsionnels de haute fréquence, proportionnels aux fronts des tensions de sortie, prennent naissance et s'écoulent via les capacités de fuite de tous les composants du circuit de sortie (IGBT, câble de liaison, bobinage moteur). Ces courants reviennent à la source via le conducteur de protection PE.

Une des premières incidences est de déclencher intempestivement certains dispositifs de détection de courant de défaut situés en amont du variateur.

Une autre incidence plus grave est l'usure prématurée des roulements du moteur (piquage des pistes de roulement) dont une des causes est la suivante : la majeure partie de la capacité de fuite du moteur se forme entre les enroulements statoriques et la carcasse du moteur ; cette capacité est répartie sur la circonférence et la longueur du stator ; comme le courant s'écoule le long des bobines du stator, il se crée une différence de potentiel de haute fréquence aux extrémités du moteur ; des courants traversent alors les roulements pour se reboucler par le rotor.

Soit le schéma de l'ensemble permettant d'étudier les tensions à l'origine de des courants :



Les tensions représentées sont référencées par rapport au point N.

On appelle u_{AB} , u_{BC} et u_{CA} les tensions entre les phases d'alimentation du moteur. On appelle u_{cont} la tension redressée et v_O la tension au point commun des bobines du stator.

Pour simplifier l'étude, on suppose v_+ et v_- constants et égaux respectivement à leur valeur moyenne.

La tension entre phases au secondaire du transformateur $U = 400$ V.

On suppose enfin que le pont redresseur est en conduction ininterrompue.

Q62. Déterminer les valeurs moyennes de v_+ , v_- , et u_{cont} , respectivement désignées V_+ , V_- et U_{cont} .

Le document réponse DR3 fait apparaître les tensions u_{AB} , u_{BC} , u_{CA} et v_A .

Q63. Quels sont les transistors commandés lorsque $u_{BC} = +U_{cont}$ puis lorsque $u_{BC} = -U_{cont}$. Déduire alors les tensions v_B et v_C .

Q64. Quels sont les transistors commandés lorsque $u_{BC} = 0$. Déduire alors les tensions v_B et v_C .

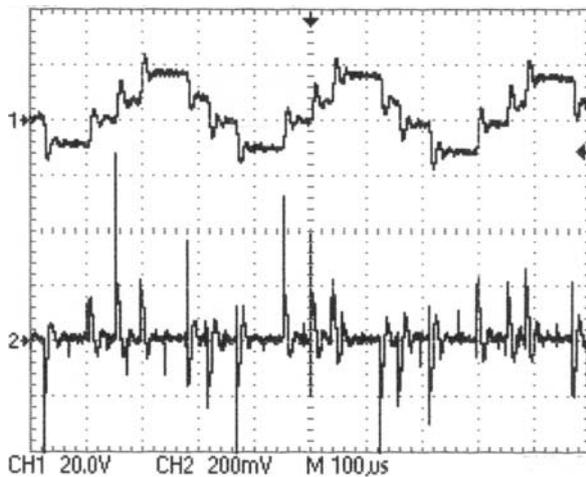
Q65. Compléter le document réponse DR3 en traçant les formes d'ondes de v_B et v_C .

Q66. Exprimer v_O en fonction de v_A , v_B et v_C .

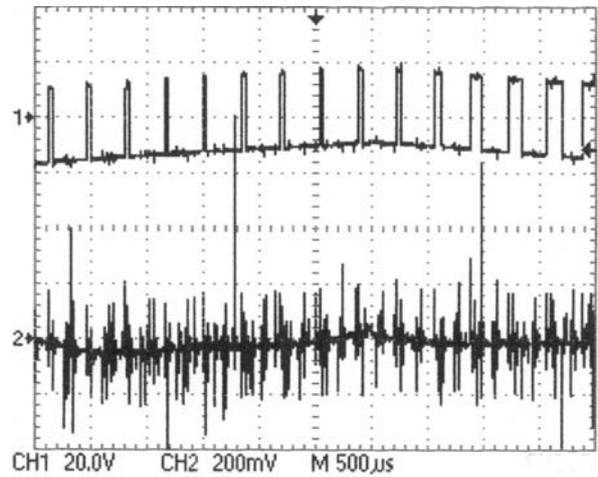
Q67. Tracer sur le document réponse DR3 la forme d'onde de v_O .

EXPLOITATION PÉDAGOGIQUE

Soient les relevés suivants effectués en essais de systèmes sur un ensemble moto variateur :



Tension v_O et courant dans le PE



Tension v_A et courant dans le PE

CH1 : sonde de tension calibre 1 / 200 CH2 : sonde de courant calibre 100 mV/A

Q68. Commenter ces relevés.

Q69. Proposer des solutions pour réduire ces courants.

Dans les laboratoires d'essais de systèmes, une protection par disjoncteur différentiel 30 mA est obligatoire. Ce dernier a tendance à déclencher intempestivement lors de la mise en service d'un variateur de génération récente.

Q70. Proposer des solutions pour éviter ces déclenchements intempestifs.

Q71. Quelle autre incidence sur l'environnement peuvent avoir ces courants ?

C – PLANIFICATION DES TRAVAUX DE MODIFICATION

Rappel du contexte :

L'exploitant désirent supprimer la bêche, son service chargé des travaux confie à un groupe d'étudiants la mise en place d'un variateur de vitesse sur une des cinq pompes. Cette réalisation, objet d'un projet technique industriel, permettra de valider le fonctionnement sans bêche. Une fois ce fonctionnement validé, la mise en place des autres variateurs sera confiée à une entreprise.

Q72. Qui représente la maîtrise d'œuvre et la maîtrise d'ouvrage dans ce projet ?

Q73. Quels documents administratifs vous semblent nécessaires pour la réalisation de ce projet par vos étudiants ?

Dans ce projet, l'automate ne donnera que des ordres de marche et le capteur de pression sera relié directement au variateur.

On utilisera les fonctions évoluées qu'offrent les variateurs de vitesse actuels : fonctions d'asservissement, configurations multiples dont le choix se fait par entrée TOR.

Voici la liste des tâches recensées avec le client (service chargé des travaux) :

- T1 : contact initial sur le site
- T2 : analyse du mode château d'eau sans bêche (mode 1)
- T3 : analyse du mode surpresseur (mode 2)
- T4 : détermination de la puissance du variateur
- T5 : environnement variateur (contacteurs, sectionneurs, fusibles, selfs de lissage)
- T6 : devis variateur (2 variateurs de marque différente doivent être proposés)
- T7 : câblage variateur au lycée
- T8 : recherche des paramètres variateur pour le mode 1
- T9 : recherche des paramètres variateur pour le mode 2
- T10 : essais et paramétrage variateur au lycée (hors puissance)
- T11 : essais variateur sur site (présence du fournisseur)
- T12 : essais hydrauliques sur site (présence des agents d'exploitation)
- T13 : comptes rendus d'essais
- T14 : choix des câbles de puissance
- T15 : vérification compatibilité et choix éventuel du disjoncteur de tête
- T16 : devis câbles (et disjoncteur éventuel)
- T17 : schéma implantation câbles sur site (pose des câbles réalisée par les agents)
- T18 : vérification câblage sur site
- T19 : choix armoire et plan d'implantation interne
- T20 : étude thermique armoire et choix éventuel d'un dispositif de refroidissement
- T21 : devis armoire
- T22 : préparation (perçages) et câblage armoire (hors variateur)
- T23 : vérification câblage général (au lycée)
- T24 : schéma d'implantation armoire sur site (préparation sur site effectuée par les agents)
- T25 : montage armoire sur site
- T26 : planification des essais de l'armoire sur site (mise en service, ...)
- T27 : vérification électriques armoire sur site
- T28 : vérification thermique armoire sur site
- T29 : choix capteur de pression et câble de liaison
- T30 : devis capteur
- T31 : schéma d'implantation capteur sur site (pose du capteur effectué par les agents)
- T32 : essais du capteur sur site
- T33 : schémas électriques réalisés sous logiciel compatible avec celui du client
- T34 : validation des devis par le client et commande
- T35 : validation des travaux demandés aux agents par le client et ordre de lancement

Le client impose les contraintes suivantes :

- La validation des devis se fait lors d'une seule réunion et le délai de livraison du matériel est d'environ 3 semaines ;
- La validation des travaux demandés aux agents se fait aussi lors d'une seule autre réunion et le délai de réalisation est d'environ 3 semaines.

On vous propose d'organiser le projet sur 12 semaines de 16 heures chacune.

Le document réponse DR4 fait apparaître la durée estimée de chaque tâche.

Une analyse avec un logiciel de gestion de projet a fait apparaître le chemin critique suivant :

T1, T2, T3, T4, T5, T19, T20, T21, T34, T22, T7, T23, T10, T25, T27, T11, T12, T13.

Q74. Que représente ce chemin critique ? Quelle sera la durée minimale du projet ?

Q75. Compléter le planning du document réponse DR4 en grisant les cases adéquates.

On propose la réalisation du projet par un groupe de 3 étudiants.

Le client désire qu'un étudiant soit chargé des réunions de chantier : organisation et comptes rendus.

Un autre étudiant sera chargé de centraliser les commandes et d'en assurer le suivi. Le troisième étudiant sera responsable des schémas.

Q76. Proposer sur le document réponse DR5 une répartition des tâches pour chaque étudiant, sachant qu'il est préférable d'effectuer certaines tâches en commun. Vous ferez apparaître le nombre total d'heures en veillant à ce qu'il soit à peu près identique pour les 3 étudiants.

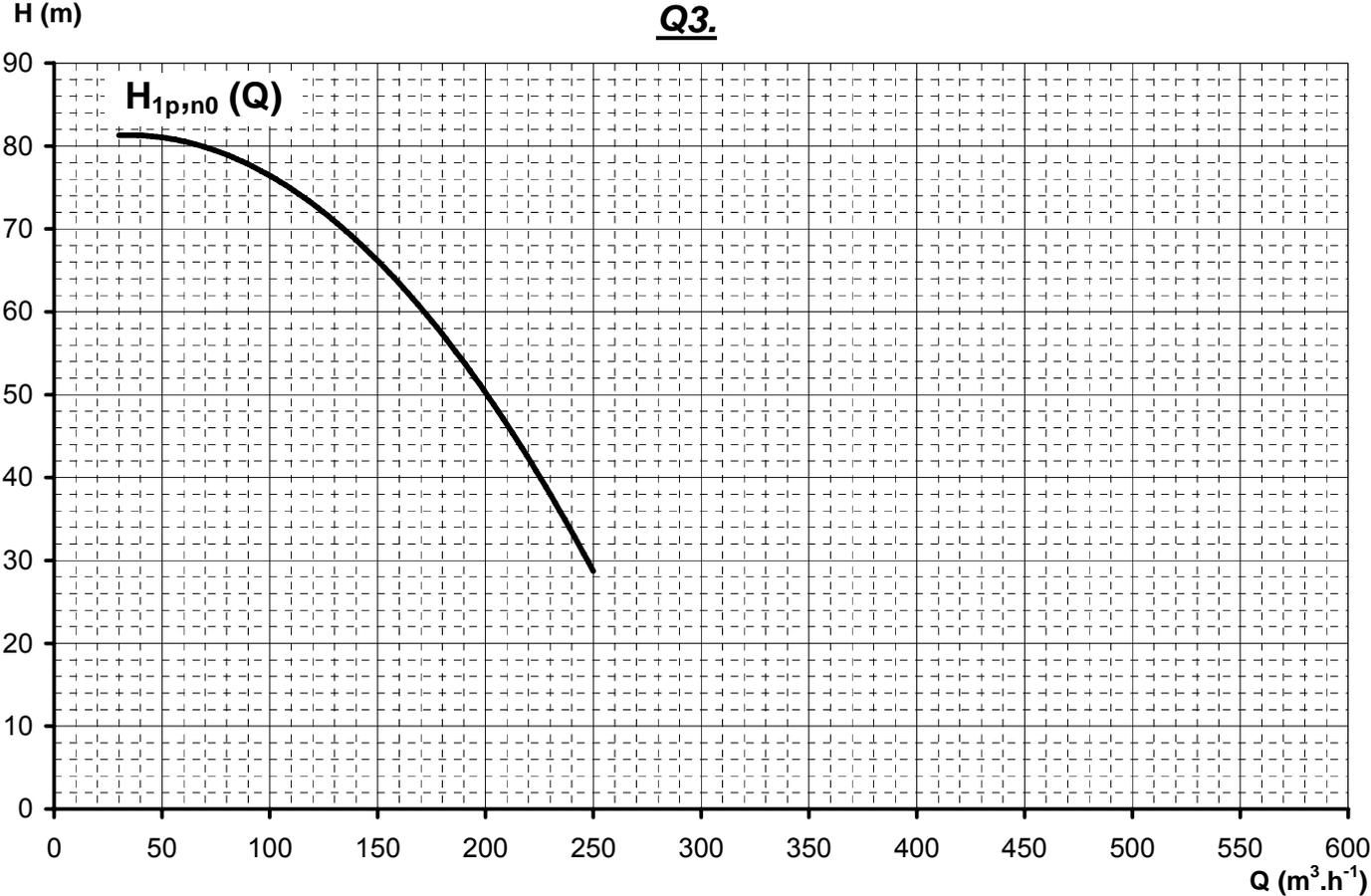
Trois revues de projet d'une durée de 20 min chacune doivent être insérées dans le planning :

- une revue d'organisation du projet permettant de vérifier l'aptitude de l'étudiant à :
 - participer à l'élaboration d'un cahier des charges,
 - rechercher et exploiter des documents,
 - déterminer les coûts du matériel et des ressources,
 - déterminer et planifier les tâches.
- une revue de conception du projet permettant de vérifier l'aptitude de l'étudiant à :
 - suivre l'organisation et la réalisation d'une production,
 - concevoir des plans, schémas et organigrammes,
 - déterminer les grandeurs à contrôler et identifier les paramètres réglants,
 - dialoguer et échanger des informations avec les membres d'une équipe.
- une revue de mise en œuvre du projet permettant de vérifier l'aptitude de l'étudiant à :
 - élaborer et suivre une procédure de mesure ou d'essai,
 - choisir le matériel de mesurage adapté,
 - réaliser des mesures ou des essais qualitatifs en toute sécurité,
 - interpréter les résultats obtenus,
 - traduire l'écriture d'un processus de fonctionnement en langage compatible avec un système programmable industriel,
 - réaliser tout ou partie d'un ouvrage, un équipement ou un produit,
 - procéder à la mise en service d'un appareillage,
 - analyser les causes de dysfonctionnement.

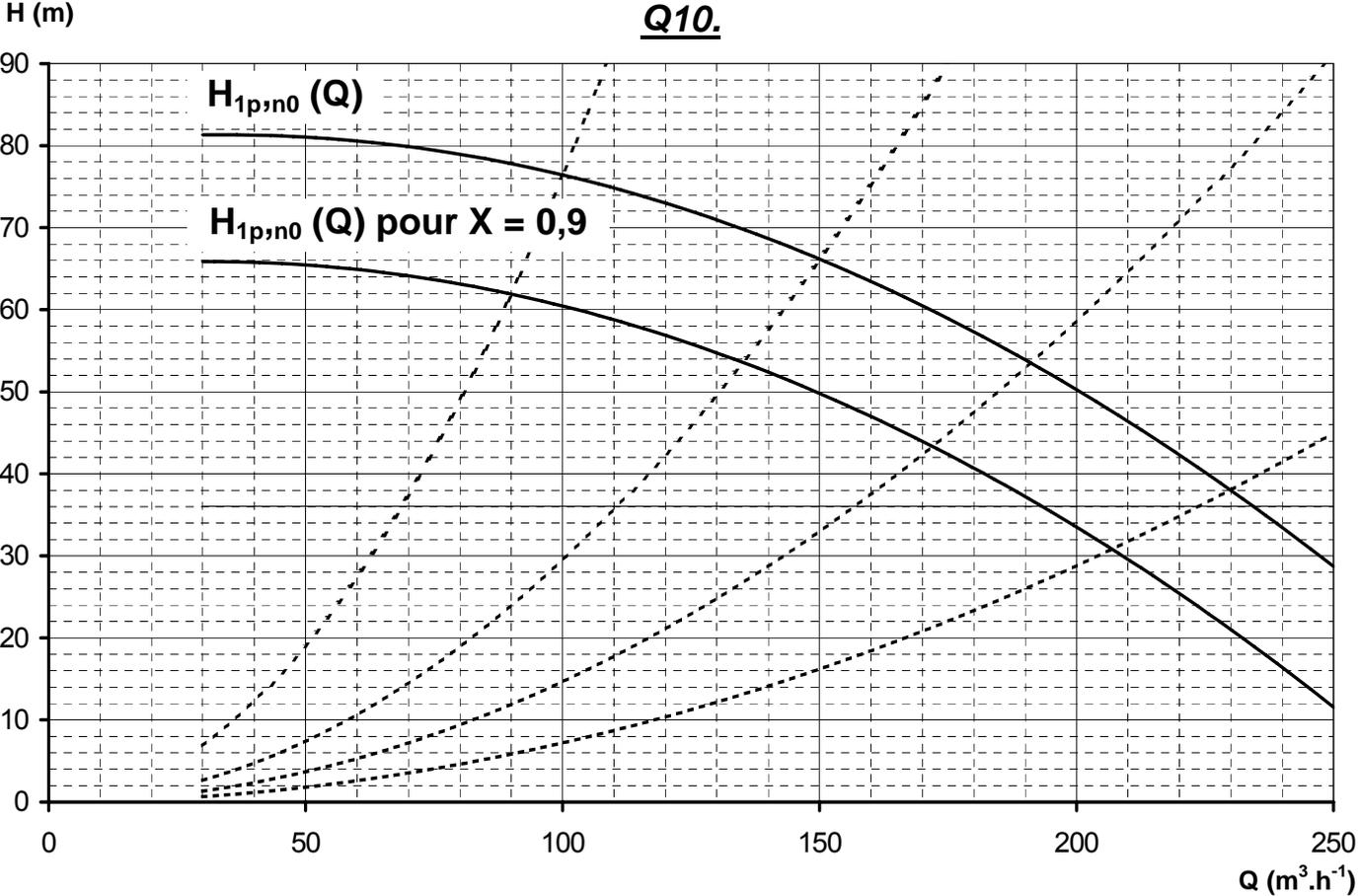
Q77. Proposer des dates de revues de projet. Ces dates seront exprimées relativement au début du planning.

DOCUMENT RÉPONSE DR1

Q3.

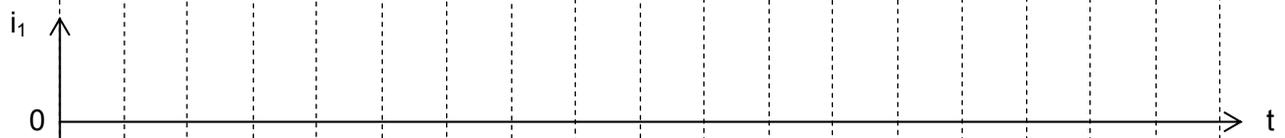
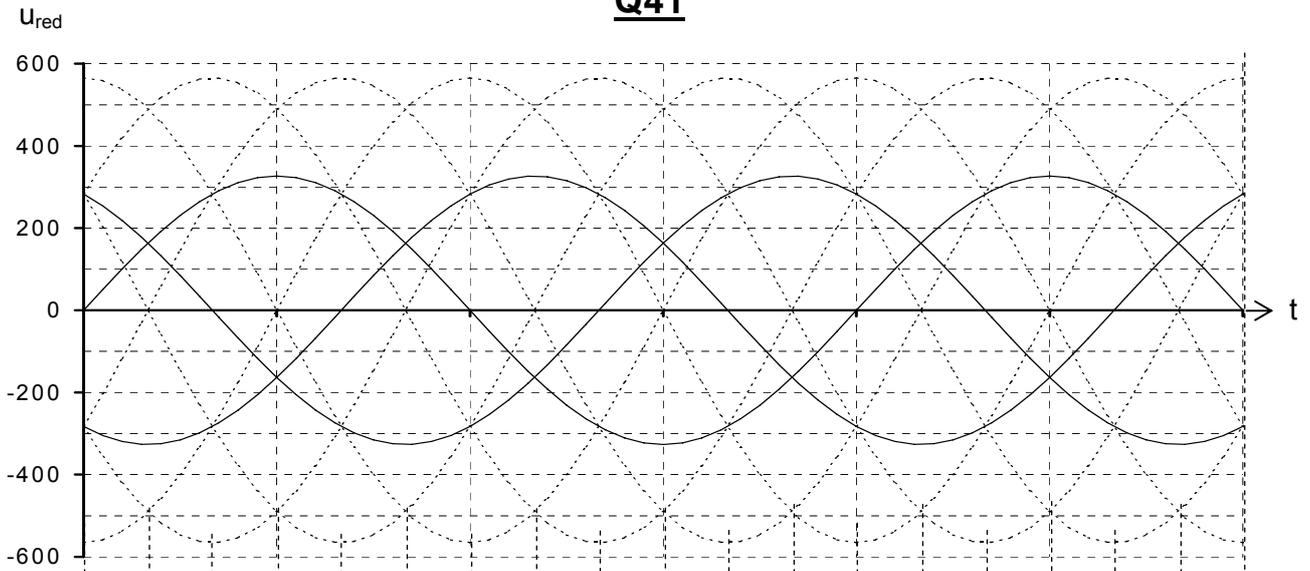


Q10.

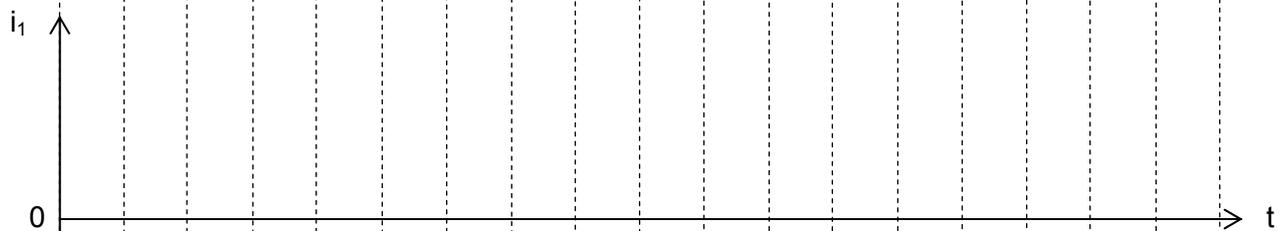
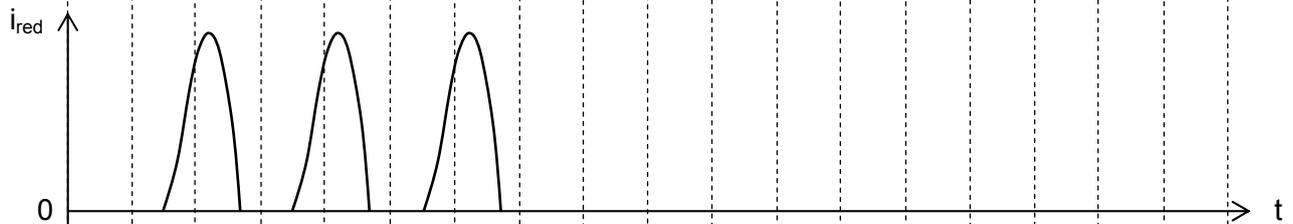


DOCUMENT RÉPONSE DR2

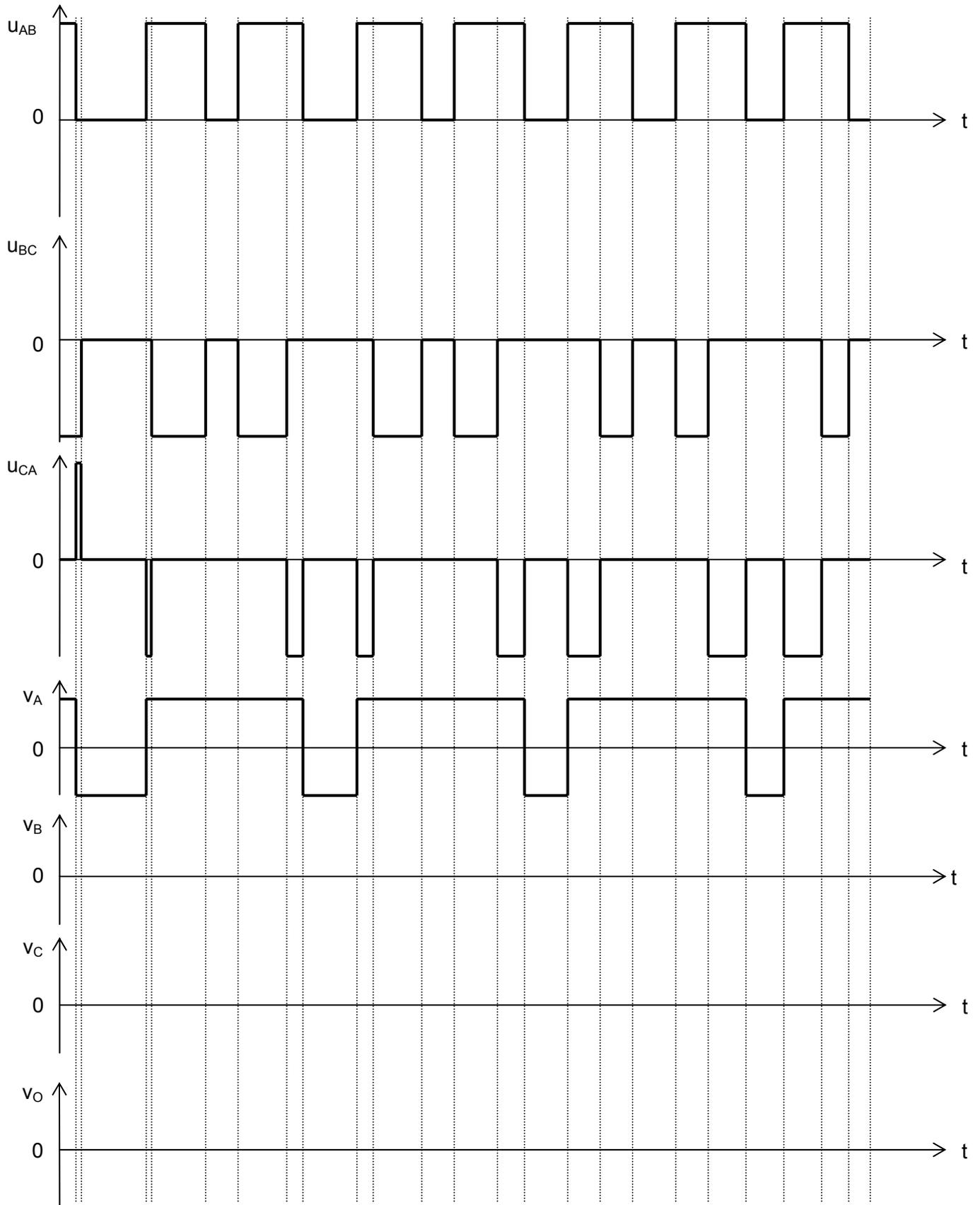
Q41



Q44



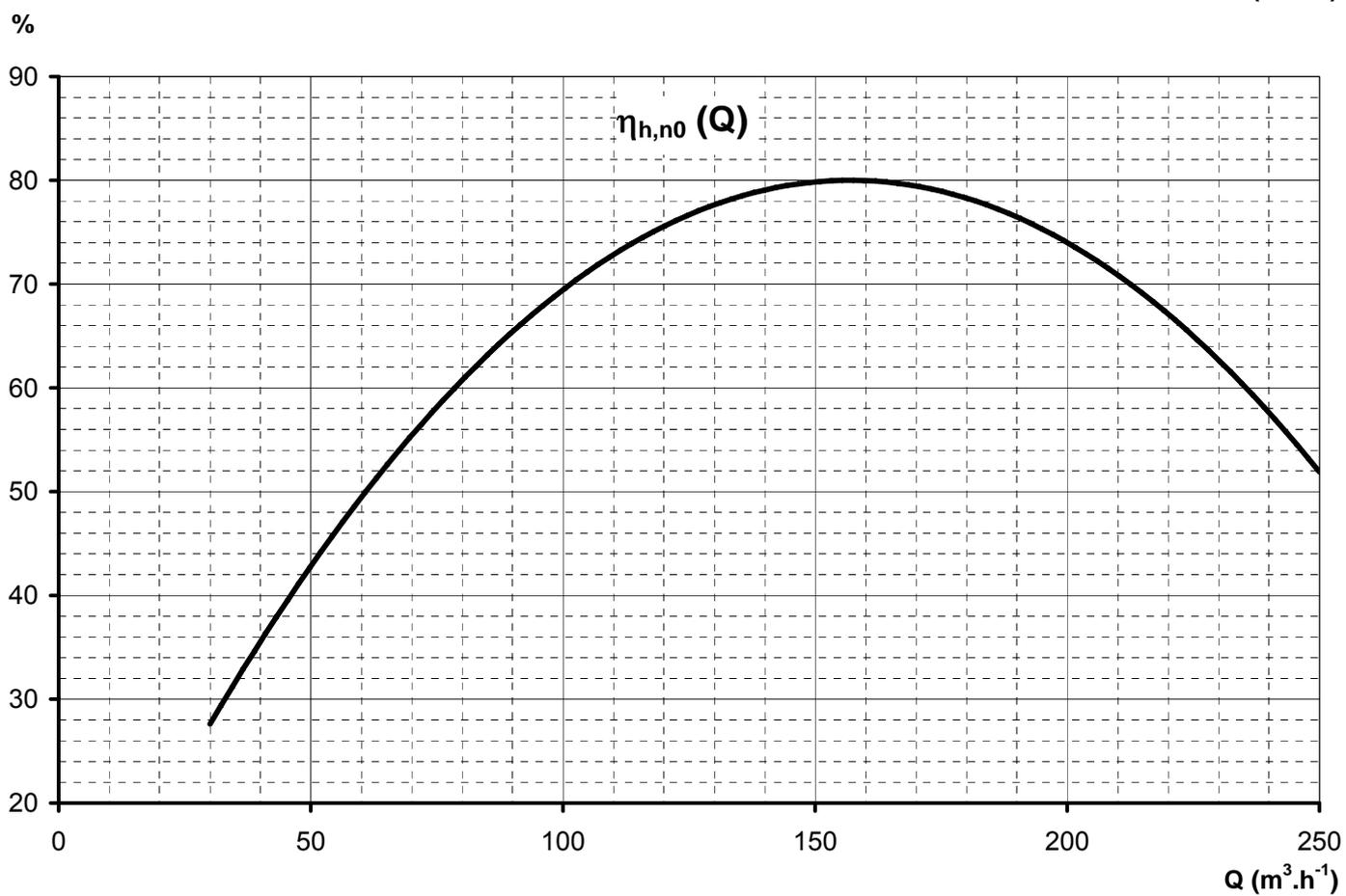
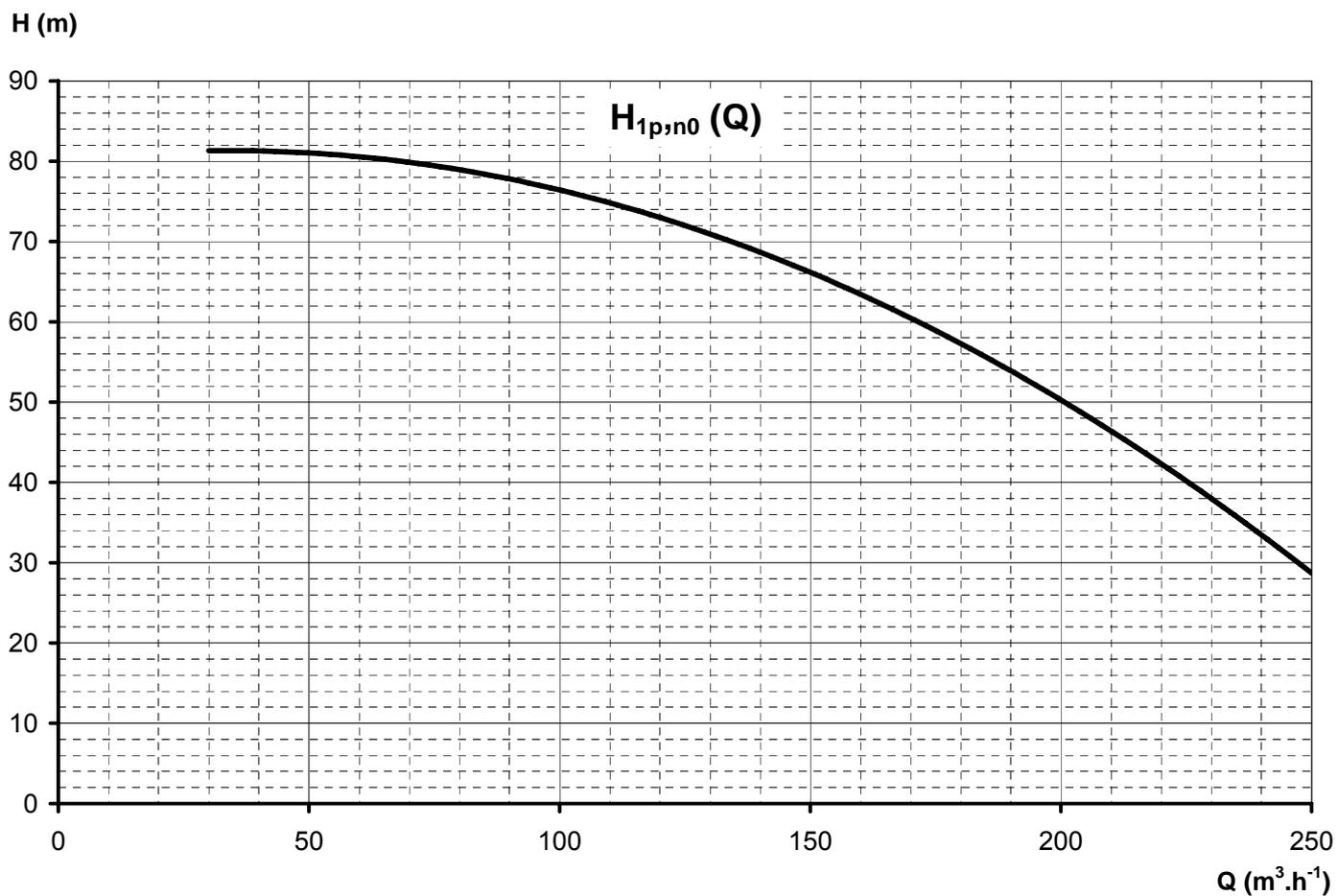
DOCUMENT RÉPONSE DR3



DOCUMENT RÉPONSE DR5

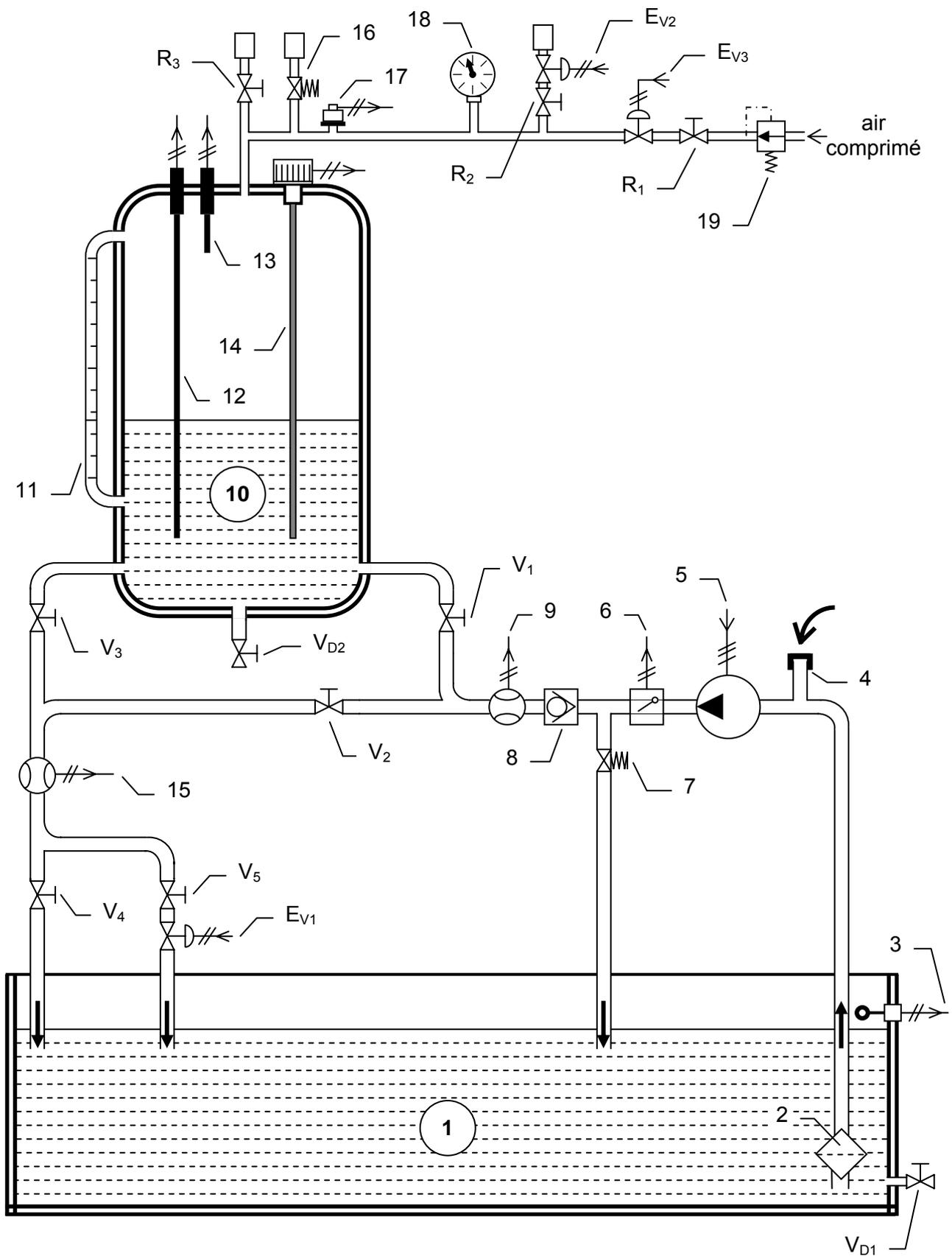
	Étudiant 1	Étudiant 2	Étudiant 3
Étude technique et économique			
Analyse du cahier des charges			
T1 : contact initial sur le site			
T2 : analyse du mode château d'eau sans bâche (mode 1)			
T3 : analyse du mode surpresseur (mode 2)			
Concevoir des solutions techniques			
T4 : détermination de la puissance du variateur			
T5 : environnement variateur			
T14 : choix des câbles de puissance			
T15 : disjoncteur de tête			
T19 : choix armoire et plan d'implantation interne			
T20 : étude thermique armoire			
T29 : choix capteur de pression et câble de liaison			
T8 : recherche des paramètres variateur pour le mode 1			
T9 : recherche des paramètres variateur pour le mode 2			
Élaboration d'une offre adaptée			
T6 : devis variateur			
T16 : devis câbles (et disjoncteur éventuel)			
T21 : devis armoire			
T30 : devis capteur			
Dossiers de fabrication et d'exécution d'un chantier			
T17 : schéma implantation câbles sur site			
T24 : schéma d'implantation armoire sur site			
T31 : schéma d'implantation capteur sur site			
T33 : schémas électriques réalisés sous logiciel			
Réalisation et exécution			
T22 : préparation et câblage armoire (hors variateur)			
T7 : câblage variateur au lycée			
T25 : montage armoire sur site			
Planification, suivi technique et maîtrise des coûts			
T26 : planification des essais de l'armoire sur site			
Centraliser les commandes et en assurer le suivi			
Essais, mise en service et contrôle			
T23 : vérification câblage général (au lycée)			
T10 : essais et paramétrage variateur au lycée			
T18 : vérification câblage sur site			
T32 : essais du capteur sur site			
T27 : vérification électriques armoire sur site			
T11 : essais variateur sur site (présence du fournisseur)			
T12 : essais hydrauliques sur site			
T28 : vérification thermique armoire sur site			
T13 : comptes rendus d'essais			
Relations clients - fournisseurs			
T34 : validation des devis par le client et commande			
T35 : validation des travaux demandés aux agents			
Réunions de chantier : organisation et comptes rendus			
TOTAL			

DOCUMENT ANNEXE A 1



DOCUMENT ANNEXE A2

SOUS-SYSTEME NIVEAU – DÉBIT : schéma hydraulique



DOCUMENT ANNEXE A3

SOUS-SYSTEME NIVEAU – DÉBIT : nomenclature

Schéma hydraulique

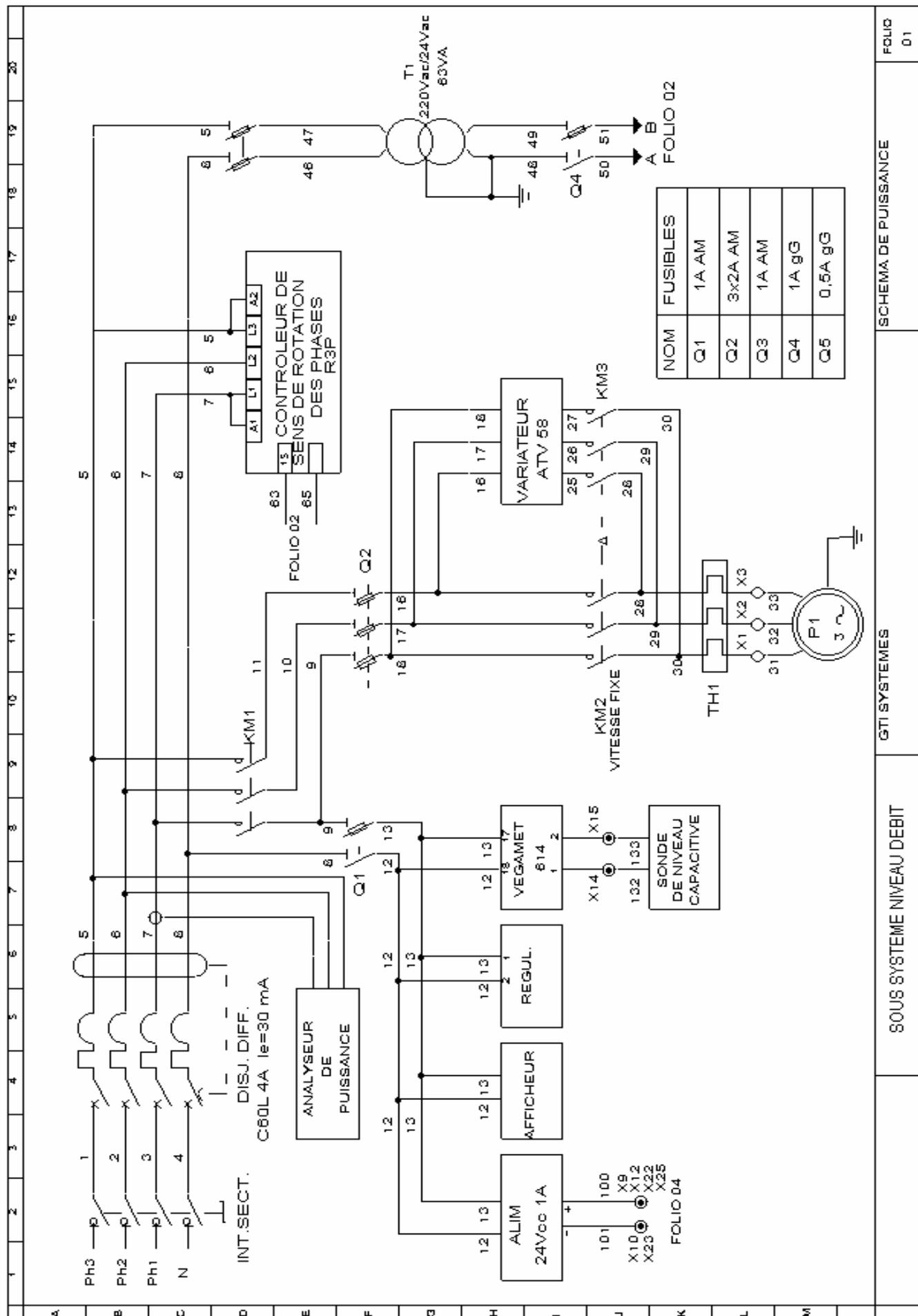
1	Bâche	V ₁	Vanne d'entrée du réservoir
2	Crépine	V ₂	Vanne by-pass du réservoir
3	Niveau bâche	V ₃	Vanne de sortie du réservoir
4	Amorçage de la pompe	V ₄	Vanne de réglage de l'utilisation
5	Pompe	V ₅	Vanne de réglage de la perturbation
6	Contrôle de débit		
7	Soupape de sécurité pression d'eau	E _{V1}	Électrovanne de perturbation
8	Clapet anti retour	E _{V2}	Électrovanne d'évacuation d'air
9	Capteur de débit d'entrée (sortie 4-20 mA)	E _{V3}	Électrovanne d'admission d'air
10	Réservoir de stockage		
11	Indicateur de niveau	R ₁	Robinet d'arrivée d'air
12	Sonde de niveau bas	R ₂	Robinet d'échappement d'air
13	Sonde de niveau haut	R ₃	Robinet de mise à l'air libre
14	Capteur de niveau (sortie 4-20 mA)		
15	Capteur de débit de sortie (sortie 4-20 mA)	V _{D1}	Vidange de la bâche
16	Soupape de sécurité pression d'air	V _{D2}	Vidange du réservoir
17	Capteur de pression d'air		
18	Manomètre		
19	Détendeur d'air comprimé		

Schémas électriques

KM1	Contacteur de ligne	DNRT – NBH	Niveau ballon haut
KM2	Pompe vitesse fixe	DNRT – NBB	Niveau ballon bas
KM3	Pompe vitesse variable	DMR1	Seuil d'admission
KA1	Admission d'air	DMR2	Seuil d'échappement
KA2	Échappement d'air	DEBIT	Présence débit
DT1	Tempo désamorçage	NIVEAU	Niveau bâche
EV1	Électrovanne perturbation	R3P	Rotation des phases
EVA	Électrovanne admission	TH1	Thermique pompe
EVE	Électrovanne échappement	RD1	Altivar OK
VTE	Voyant présence tension	X13	sortie 4-20 mA du capteur de pression d'air

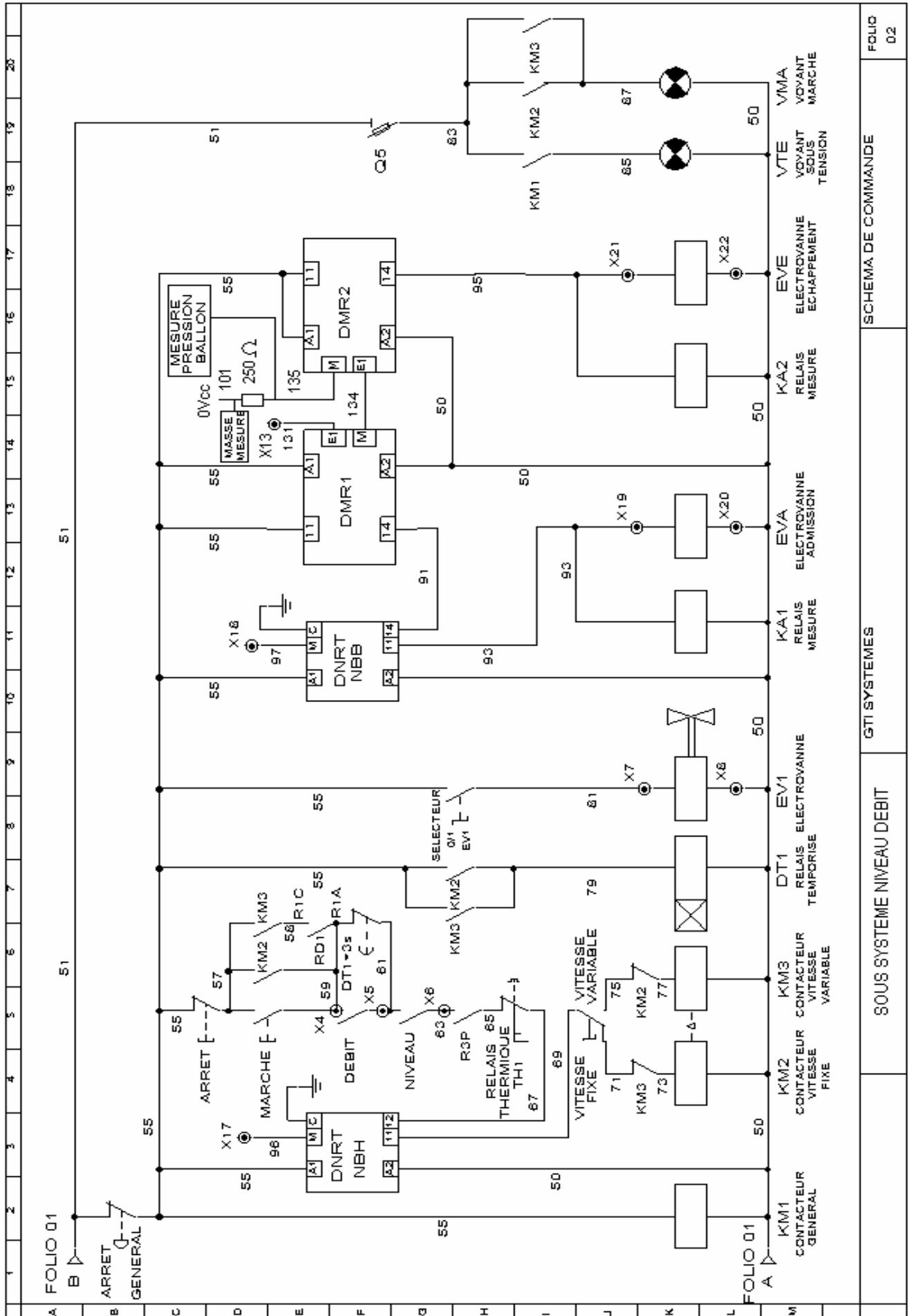
Circuit mesure du débit d'entrée non représenté.

DOCUMENT ANNEXE A4

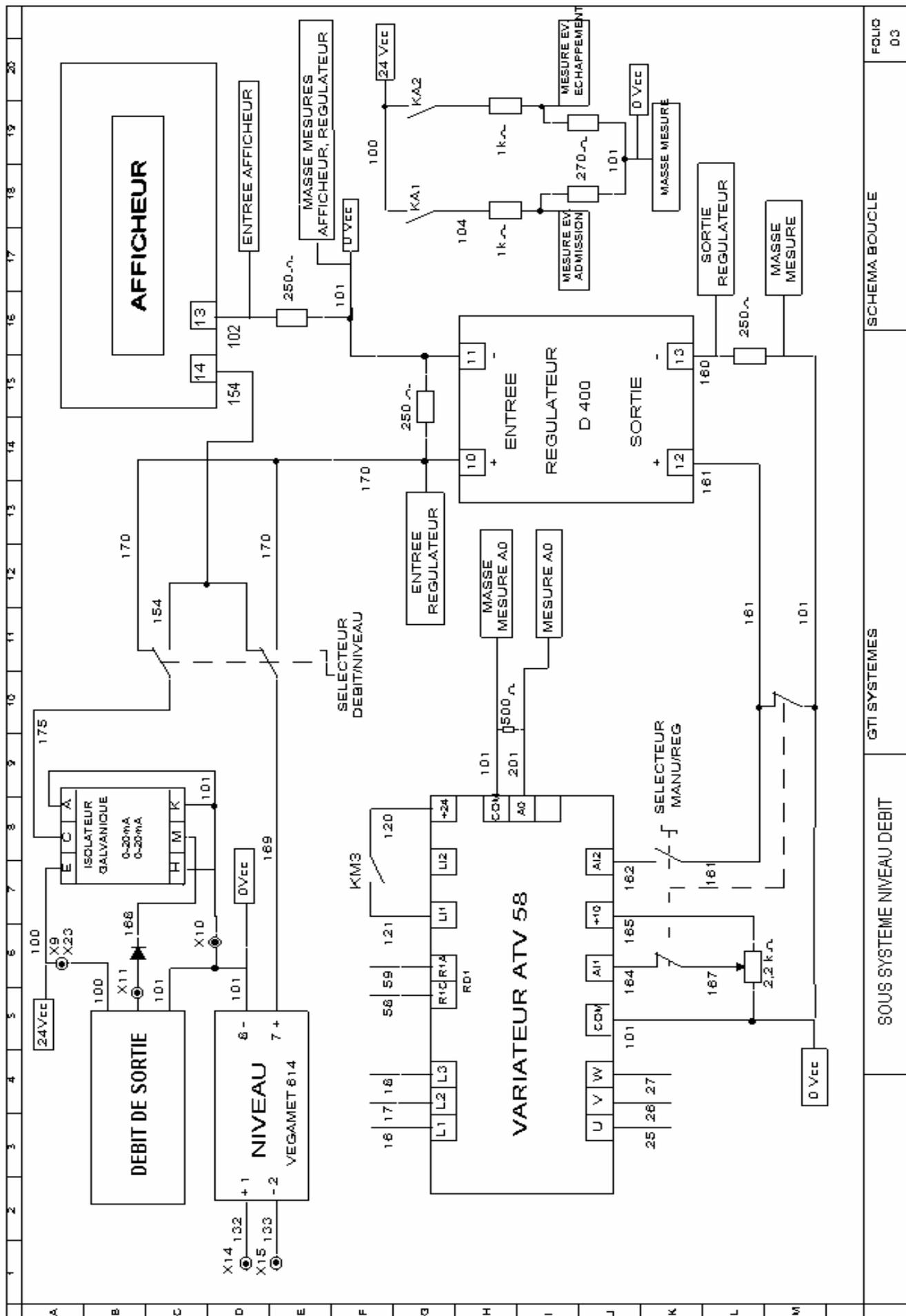


NOM	FUSIBLES
Q1	1A AM
Q2	3x2A AM
Q3	1A AM
Q4	1A 9G
Q5	0,5A 9G

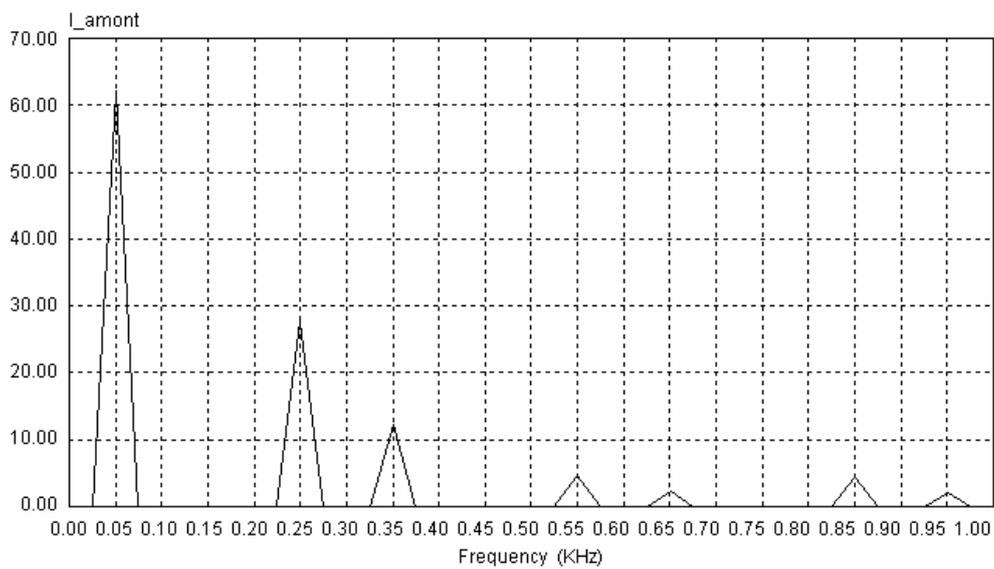
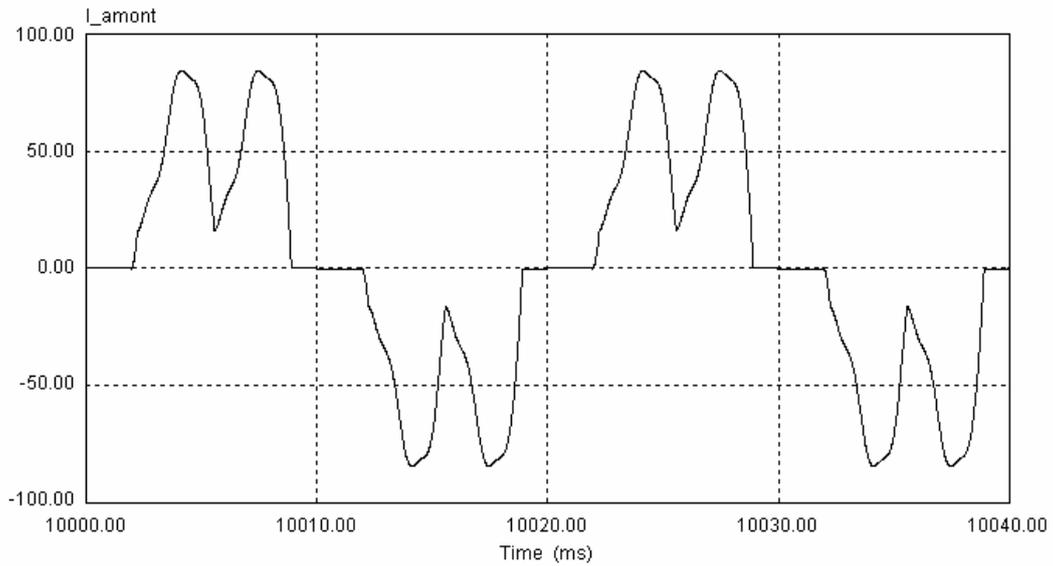
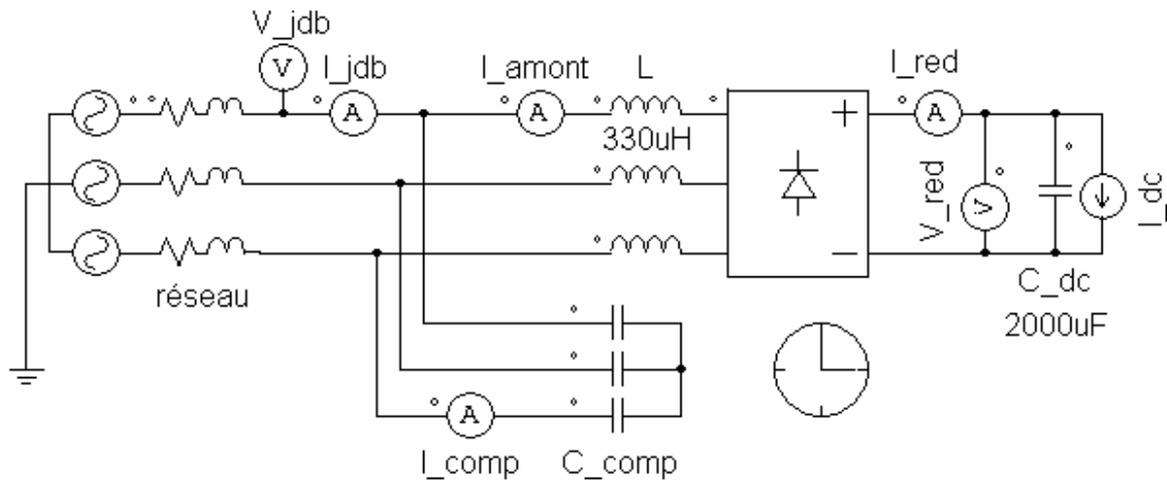
DOCUMENT ANNEXE A5



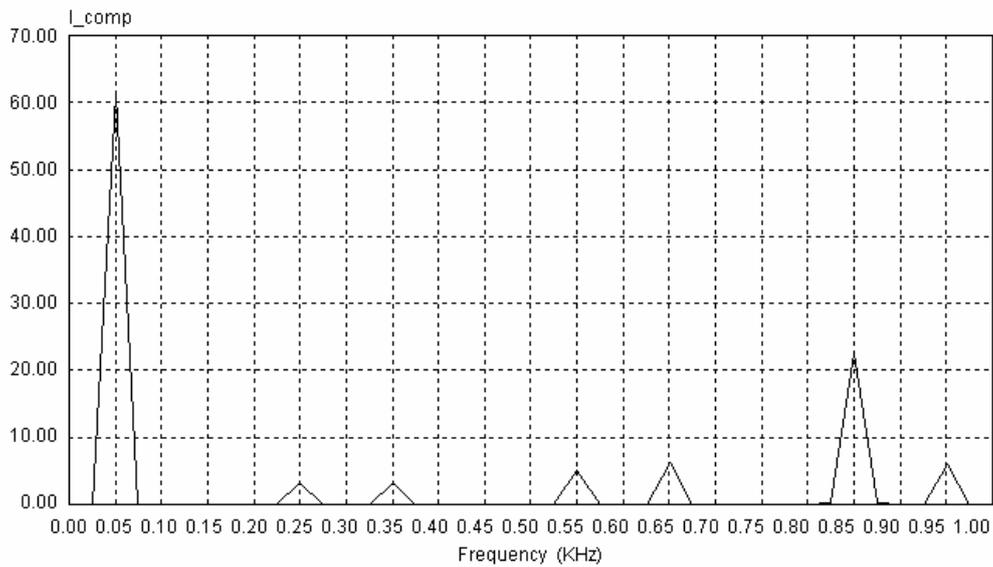
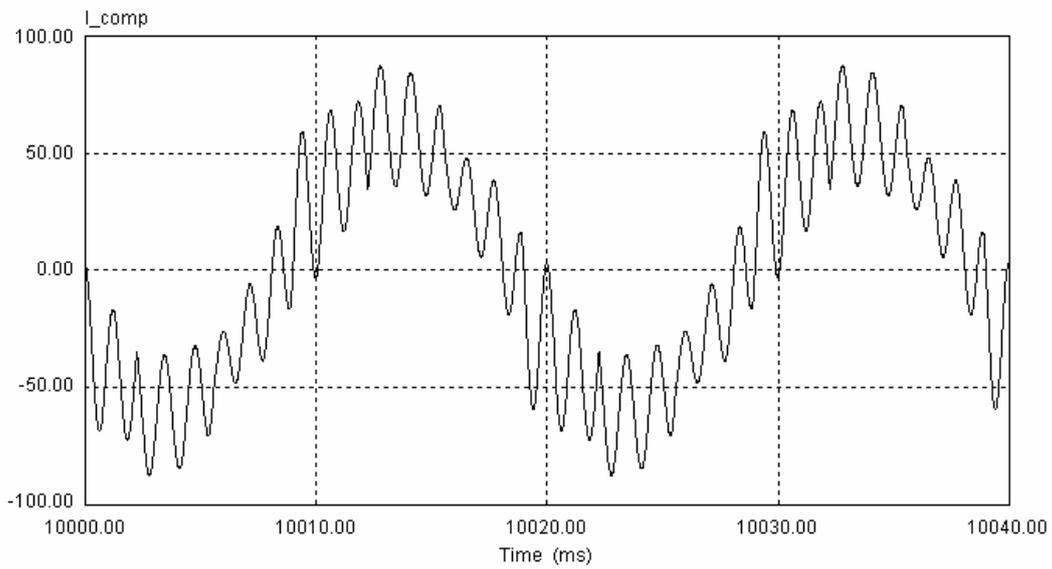
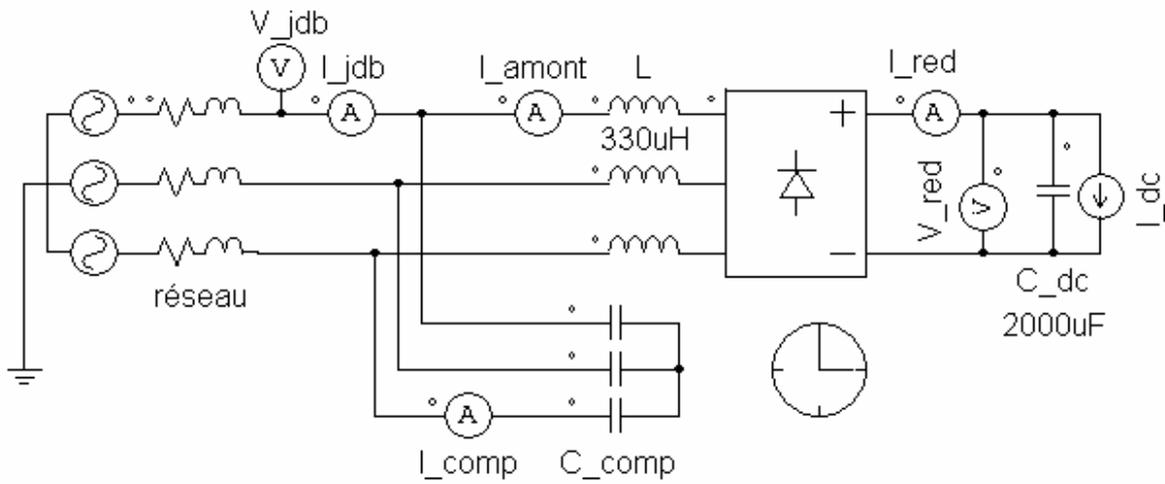
DOCUMENT ANNEXE A6



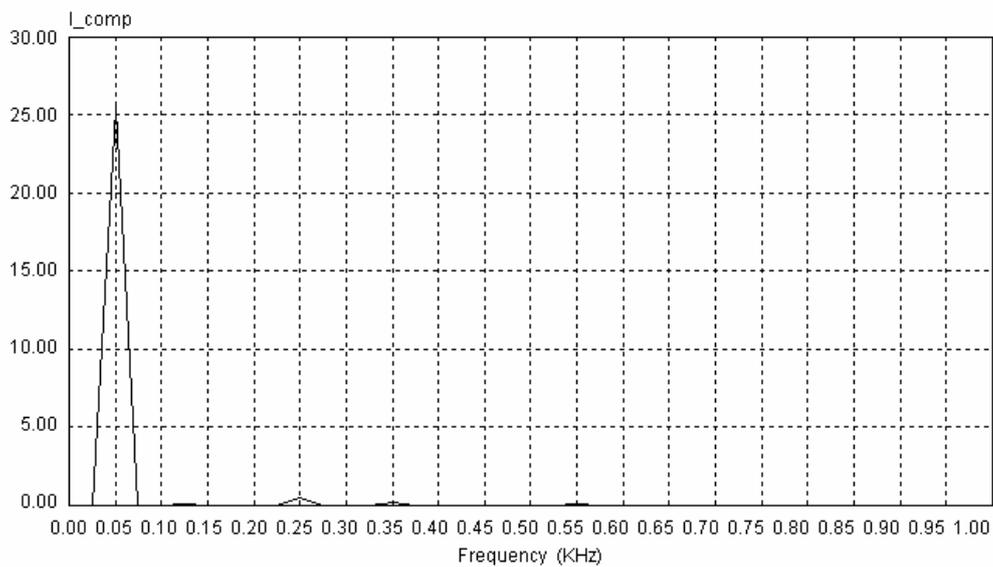
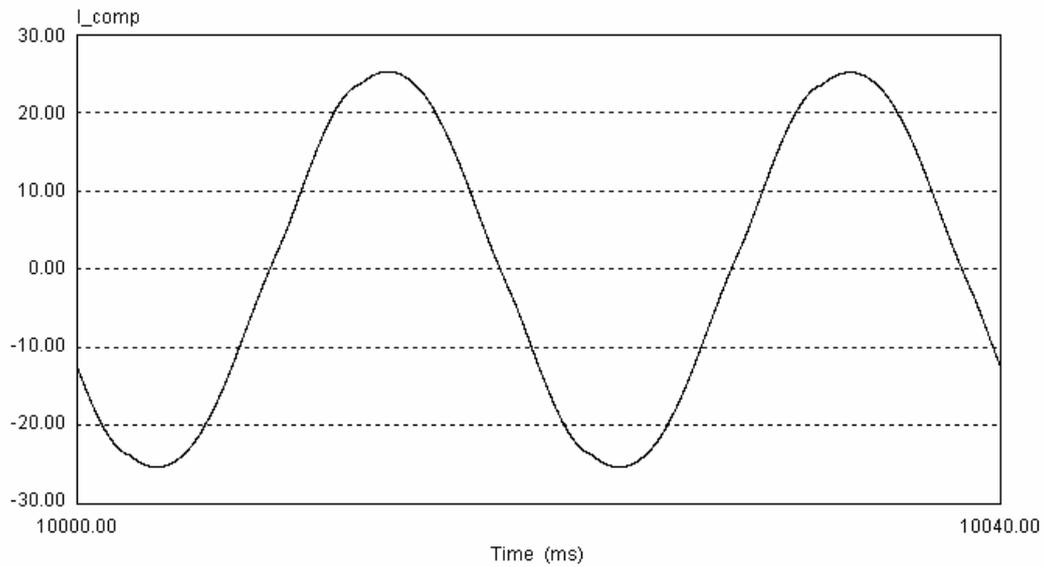
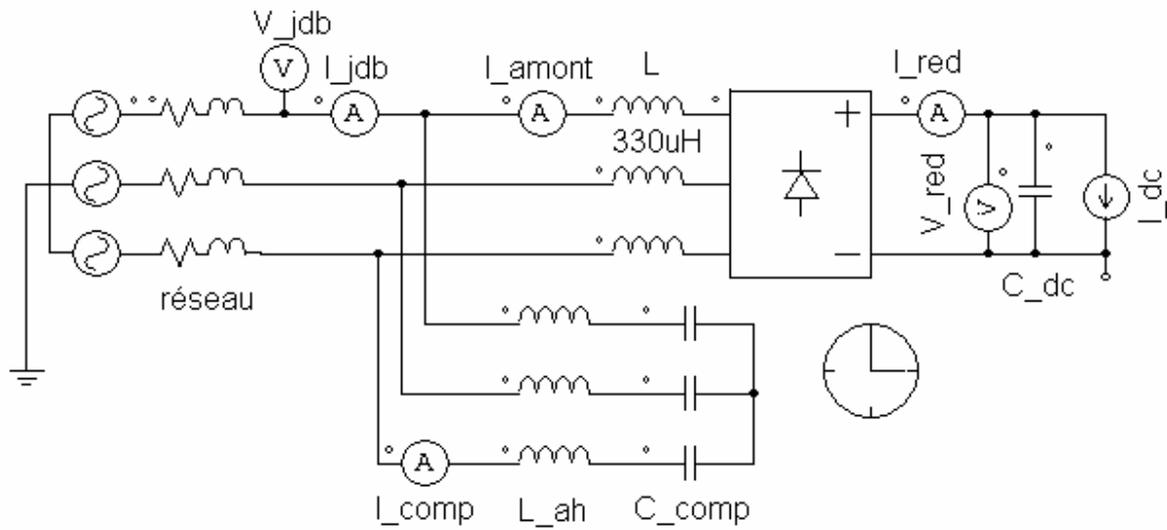
DOCUMENT ANNEXE A7



DOCUMENT ANNEXE A8



DOCUMENT ANNEXE A9



ALIMENTATION EN EAU POTABLE ÉLÉMENTS DE CORRECTION

Q1.

$$H_r = 62,08 + 115,26 \cdot Q^2 \quad H_r = (90,27 - 28,19) + \left(\frac{1,75}{0,125^2} + \frac{1/(2 \cdot 9,81)}{0,125^2} \right) \cdot Q^2$$

Q2.
 $W = m \cdot g \cdot H_r \quad P_h = dW / dt = (dm / dt) \cdot g \cdot H_r = \rho \cdot (dV / dt) \cdot g \cdot H_r$ avec V le volume en m³
 or $Q = dV / dt$ d'où $P_h = \rho \cdot Q \cdot g \cdot H_r = \rho \cdot g \cdot H_r \cdot Q$

Q3. Voir DR1.
 P1 : (64 m, 158 m³.h⁻¹) P2 : (64 m, 316 m³.h⁻¹) P3 : (64 m, 474 m³.h⁻¹)

Q4.
 Il faut résoudre $a \cdot (Q / N)^2 + b \cdot (Q / N) + c = k_s + k_v \cdot Q^2$ soit $(a/N^2 - k_v) \cdot Q^2 + (b/N) \cdot Q + (c - k_s) = 0$
 Si N = 1, l'équation est $-14755 \cdot Q^2 + 278 \cdot Q + 17,92 = 0$,
 ce qui donne $Q = 0,04552 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (163,9 m³.h⁻¹) et H = 62,32 m.
 Si N = 2, l'équation est $-3775 \cdot Q^2 + 139 \cdot Q + 17,92 = 0$,
 ce qui donne $Q = 0,08973 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (323 m³.h⁻¹) et H = 63 m.
 Si N = 3, l'équation est $-1742 \cdot Q^2 + 92,7 \cdot Q + 17,92 = 0$,
 ce qui donne $Q = 0,1315 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (473,3 m³.h⁻¹) et H = 64,1 m.

Q5.
 Algébriquement, on trouve $Q = 0,1317 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (474 m³.h⁻¹) en résolvant $-1627 \cdot Q^2 + 92,7 \cdot Q + 16 = 0$.
 Graphiquement, on trouve une valeur proche de 475 m³.h⁻¹.
 Chaque pompe a un débit de 158 m³.h⁻¹, soit $P_h = 1000 \cdot 9,81 \cdot 64 \cdot (158/3600) = 27555,2 \text{ W}$.
 Le rendement de la pompe est quasiment égal à 0,8. D'où $P = 34444 \text{ W}$ pour chaque pompe.

Q6.
 $P / P_n = 0,765$, donc le rendement de chaque moteur est d'environ 89,6 %.
 D'où $P_{3abs} = 3 \cdot 34444 / 0,896 = 3.38442 = 115326 \text{ W}$.

Q7.
 (2180 – 1790) = 390 m³ sont pompés aux heures creuses.
 Le pompage de chaque m³ nécessite (38442 / 158) = 243,3 Wh.
 Le volume de 390 m³ pompé sur une année, hors dimanche, représente une énergie de
 $390 \cdot 243,3 \cdot (365 - 52) / 1000 = 29700 \text{ kWh}$
 Le tarif HCH prend fin à 6h et le tarif de pointe n'intervient qu'après 9 h. Donc le surplus pompé la nuit sera consommé au tarif HPH.
 La différence de tarif est de (4,007 – 3,052) = 0,955 c€ / kWh et ce durant 5 mois.
 D'avril à octobre, la différence entre le tarif HPE et le tarif HCE est de (2,35 – 1,455) = 0,895 c€ / kWh.
 L'économie est donc égale à $29700 \cdot (5 \cdot 0,955 + 7 \cdot 0,895) / 12 = 27324 \text{ c€} = 273 \text{ €}$.

Q8.
 Faire varier la pression dans le ballon et relever le débit d'entrée.
 $HMT = (\text{pression ballon} / 9810) + P_{dc} \cdot (\text{débit} / Q_0)^2$

Q9.
 $H_r = 36,04 \text{ m} \quad H_r = (90,27 - 23,65) + \left(\frac{1}{1000 \cdot 9,81} \right) \cdot (1 - 4) \cdot 10^5$

Le débit est alors de 234 m³.h⁻¹ et le rendement de 60,5 %.

Q10. Voir DR1.

On place le point (157 m³.h⁻¹, 36,04 m). La parabole $\beta.Q^2$ passant par ce point croise la courbe $H_{1p,n0}(Q)$ lorsque $Q = 191 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$. Donc $X = 157 / 191 = 0,822$, d'où $n = 0,822.1455 = 1196 \text{ tr}.\text{min}^{-1}$.

Q11.

$$H_{1p,n}(Q) = X^2. H_{1p,n0}(Q/X) = X^2. [a.(Q/X)^2 + b.(Q/X) + c] = a.Q^2 + b.Q.X + c.X^2.$$

Q12.

$$H_r = (90,27 - 23,65) + \left(\frac{1}{1000 \cdot 9,81} \right) \cdot (1 - p_1) \cdot 10^5 = 66,62 + 10,19 \cdot (1 - p_1)$$

$$H_{1p,n0} = -14640 \cdot \left(\frac{157}{3600} \right)^2 + 278 \cdot \left(\frac{157}{3600} \right) \cdot X + 80 \cdot X^2 = -27,84 + 12,12 \cdot X + 80 \cdot X^2$$

$$H_r = H_{1p,n0} \text{ pour } X = \frac{1}{2 \cdot 80} \left(-12,12 + \sqrt{12,12^2 + 4 \cdot 80 \cdot (94,46 + 10,19 \cdot (1 - p_1))} \right)$$

Littéralement :

$$X = \frac{1}{2 \cdot c} \cdot \left(- (b \cdot Q_{RM}) + \sqrt{(b \cdot Q_{RM})^2 - 4 \cdot c \cdot \left(a \cdot Q_{RM}^2 - z_2 + z_1 - \frac{1}{\rho \cdot g} \cdot (p_2 - p_1) \right)} \right)$$

Q13.

13.01 = 0 ; 13.02 = 10 V ; 11.04 = 0 ; 11.05 = 1500 tr;min⁻¹ ; 13.06 = NON

$$X = 1,014 - [(1,014 - 0,821) / 3]. (p_1 - 1) = 1,014 - 0,06433 \cdot (p_1 - 1)$$

$$X = n / n_0 = (S_i \cdot 1500 / 10000) / 1455 \text{ et } E_1 = 1000 \cdot (p_1 - 1)$$

$$S_i = 1,014 \cdot (10000 \cdot 1455 / 1500) - 0,06433 \cdot E_1 \cdot 10 \cdot (1455 / 1500)$$

$$S_i = 9836 - 0,624 \cdot E_1$$

Difficultés de traiter le produit avec des mots automate sans faire appel aux flottants.

Dans notre cas, comme $0,624 \approx 5 / 8$, on peut travailler en mots signés de 16 bits avec

$$S_i = 9836 - (5 \cdot E_1 / 8) \text{ car } 5 \cdot E_1 \text{ ne dépassera pas } (2^{15} - 1).$$

Mais il ne sera pas toujours facile de trouver un rapport convenable si le contexte change.

Q14.

13.01 = 0 ; 13.02 = 8,8 mA ou 3 V ; 11.04 = 1194 tr.min⁻¹ ; 11.05 = 1475 tr.min⁻¹ ; 13.06 = OUI ;

$$S_i = E_1$$

Q15.

$$H_r = 39,1 \text{ m}, Q = 227,5 \text{ m}^3.\text{h}^{-1} \text{ et } \eta_{h,n0} = 0,638$$

$$P_M = 9810 \cdot 39,1 \cdot (227,5 / 3600) \cdot (1 / 0,638) = 38 \text{ kW} = 85 \% \text{ de } P_n \text{ donc } \eta_M = 0,895$$

$$\text{d'où } P_{1abs} = 42,4 \text{ kW}$$

Q16.

Le débit de la pompe étant supérieur au besoin, $P_{1abs,MOY} = 42,4 \cdot (157 / 227,5) = 29,26 \text{ kW}$.

Q17.

$$H_r = 39,1 \text{ m et } X = 0,842$$

$$\eta_{h,n} = 0,772 ; P_M = 9810 \cdot 39,1 \cdot (157 / 3600) \cdot (1 / 0,772) = 21,7 \text{ kW} ;$$

$$n = 0,842 \cdot 1455 = 1225 \text{ tr}.\text{min}^{-1} \quad \text{couple} = 21700 / (\pi \cdot 1225 / 30) = 169 \text{ Nm}$$

or le couple nominal est $45000 / (\pi \cdot 1455 / 30) = 295 \text{ Nm}$. Le moteur est chargé à 57 %.

Q18.

Le variateur contrôle la vitesse.

$$\text{La vitesse de synchronisme est } 1225 + (169 / 295) \cdot (1500 - 1455) = 1251 \text{ tr}.\text{min}^{-1}.$$

$$f = 1251 / 30 = 41,7 \text{ Hz}$$

Q19.

Le rendement moteur variateur est d'environ 83,9 %.
 La puissance électrique absorbée $P_{abs} = 21,7 / (0,839) = 25,86 \text{ kW}$.

Q20.

La différence de puissance moyenne absorbée par une pompe est égale à 3,4 kW
 Il y a 78 jours en PTE + HPH, 52 jours en HPH seul, 130 jours en HCH en semaine, 22 dimanches l'hiver, 183 jours en HPE et HCE en semaine, et 30 dimanches l'été.

Le gain d'énergie journalier est de :

27,2 kWh en PTE (2 . 3,4 kW . 4 h), 81,6 kWh en HPH avec pointe (2 . 3,4 kW . 12),
 108,8 kWh en HPH seul (2 . 3,4 kW . 16), 10,88 kWh en HCH semaine (2 . 1/5 . 3,4 kW . 8 h),
 119,68 kWh en HCH dimanche (2 . 3,4 kW . 16 h + 2 . 1/5 . 3,4 kW . 8 h),
 163,2 kWh en HPE (3 . 3,4 kW . 16), 16,32 kWh en HCE semaine (3 . 1/5 . 3,4 kW . 8 h),
 179,52 kWh en HCE dimanche (3 . 3,4 kW . 16 h + 3 . 1/5 . 3,4 kW . 8 h).
 Économie d'énergie = [(27,2 . 5,241 . 78) + (81,6 . 4,007 . 78) + (108,8 . 4,007 . 52) + (10,88 . 3,052 . 130) + (119,68 . 3,052 . 22) + (163,2 . 2,35 . 183) + (16,32 . 1,455 . 183) + (179,52 . 1,455 . 30)] / 100
 = 1540 €

Q21.

En vitesse fixe, une pompe à besoin d'une puissance de 42,4 kW et en vitesse variable une puissance de 25,86 kW. D'où une économie de prime = 3. (42,4 - 25,86). 108,36 = 49,62. 108,36 = 5377 €
 Total : 6917 € / an.

Q22.

La différence de puissance moyenne absorbée par une pompe est alors égale à
 4,69 kW (29,26 - 25,86 . (95 / 100))
 Économie d'énergie = (4,69 kW / 3,4 kW) . 1540 = 2124 €
 Économie de prime = 3. [42,4 - (25,86 . 95 / 100)]. 108,36 = 53,5 . 108,36 = 5797 €
 Total : 7921 € / an.

Q23.

Il faut que $a.Q^2 + b.Q.X + c.X^2 = H_r$ avec $Q = \sqrt{H_r / \beta} = (157 / 3600) . \sqrt{H_r / 64}$
 H_r est fonction de p_1 : $H_r = 66,62 + 10,19 (1 - p_1)$
 La résolution de l'équation $c.X^2 + b.\sqrt{H_r / \beta}.X + [a . (H_r / \beta) - H_r] = 0$
 donne X d'où la consigne de fréquence de rotation.
 On obtient quasiment une droite passant par (X = 1,02 ; $p_1 = 1 \text{ bar}$) et (X = 0,75 ; $p_1 = 4 \text{ bar}$).
 On peut appliquer le même type de commande que ce qui a été vu précédemment.

Q24.

Modifier la consigne du variateur de vitesse et la pression dans le ballon.
 $HMT = (\text{pression ballon} / 9810) + P_{dc} . (\text{débit} / Q_0)^2$.
 $P_h = \rho . g . HMT . Q = 2,725 . HMT$ si HMT est en m et Q en $\text{m}^3 . \text{h}^{-1}$.
 P_{abs} mesuré à l'aide d'un wattmètre ayant une bande passante suffisante (courants absorbés non sinusoïdaux).
 $\eta = P_h / P_{abs}$

Q25.

Pour mesurer séparément le rendement de la pompe, on peut utiliser le rendement de la pompe en fonction du débit donné par le constructeur.
 Il est difficile de placer un couplemètre et un capteur de vitesse sur l'arbre moteur (ensemble compact).

Q26.

$$t_{on} = RU / (Q - Q_u) = RU / Q . (1 - \alpha) \quad t_{off} = RU / Q_u = RU / \alpha . Q$$

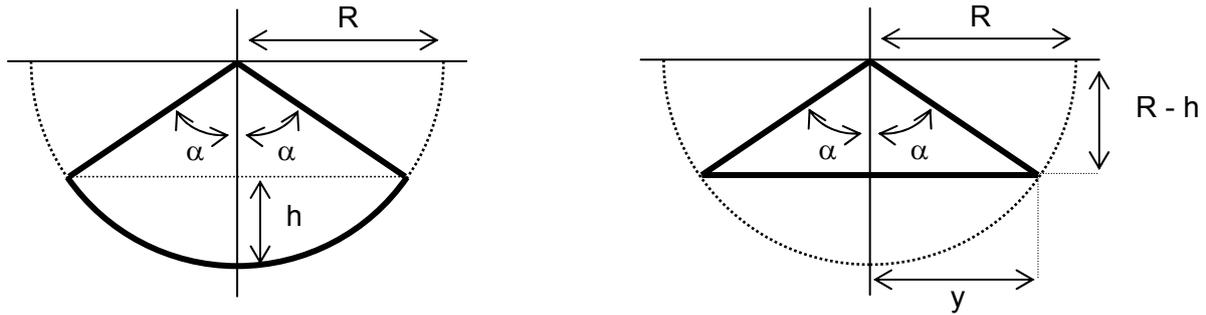
Q27.

$$t_{on} + t_{off} = T = (RU / Q) . (1 / \alpha - \alpha^2)$$

$$dT / d\alpha = - (RU / Q) . (1 - 2 . \alpha) / (\alpha - \alpha^2)^2 = 0 \text{ pour } \alpha = 1 / 2$$

ce qui donne $T_{min} = 4 . RU / Q$

Q28.



$$V_1 = L \cdot \frac{2 \cdot \alpha}{2 \cdot \pi} \cdot \pi \cdot R^2 = L \cdot R^2 \cdot \alpha = L \cdot R^2 \cdot \arccos\left(\frac{R-h}{R}\right)$$

$$V_2 = L \cdot (R-h) \cdot y = L \cdot (R-h) \cdot \sqrt{R^2 - ((R-h))^2}$$

$$V_e = V_1 - V_2 = L \cdot \left[R^2 \cdot \arccos\left(\frac{R-h}{R}\right) - (R-h) \cdot \sqrt{R^2 - ((R-h))^2} \right]$$

Q29.

$V_{e1} = 4,5 \text{ m}^3$ et $V_{e2} = 5,8 \text{ m}^3$. Donc $RU = 1,3 \text{ m}^3$ et $T_{\min} = 4 \cdot 1,3 / (147 / 3600) = 127,3 \text{ s}$.

Si on utilise une seule pompe, il y aura $(3600 / 127,3) = 28$ à 29 démarrages par heure.
Si 5 pompes permutent circulairement, chaque pompe subira 5 à 6 démarrages par heure.
Le nombre de démarrages par heure est acceptable si on permute des pompes.

Q30.

Le volume du ballon est égal à $5,5 \cdot \pi \cdot (1,863 / 2)^2 = 15 \text{ m}^3$.
Donc $V_{a1} = 15 - 4,5 = 10,5 \text{ m}^3$ et $V_{a2} = 15 - 5,8 = 9,2 \text{ m}^3$.
 $P_{\min} \cdot V_{a1} = P_{\max} \cdot V_{a2}$ donc $P_{\min} = 8,2 \cdot 9,2 / 10,5 = 7,185 \text{ bar}$.

Q31.

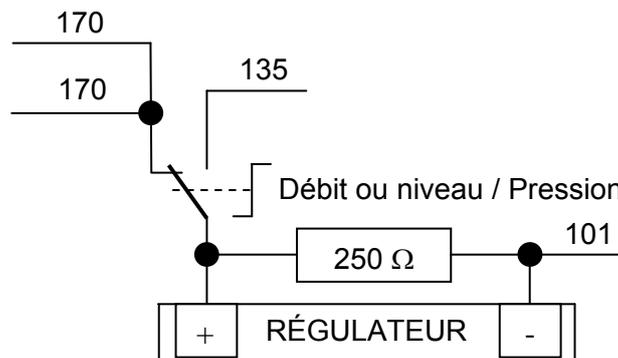
niveau = 0 % : $V_{e0} = 50 \text{ l}$, d'où $V_{a0} = 100 \text{ l}$, et $P_0 = P_{r0} + 1 = 2 \text{ bar}$
niveau = N % : $V_{eN} = 50 + 80 \cdot N / 100$, d'où $V_{aN} = 100 - 0,8 \cdot N$, et $P = P_r + 1$
 $P_0 \cdot V_{a0} = P \cdot V_{aN}$ donne $200 = [100 - 0,8 \cdot N] \cdot [P_r + 1]$ d'où $P_r = [100 + 0,8 \cdot N] / [100 - 0,8 \cdot N]$

Q32.

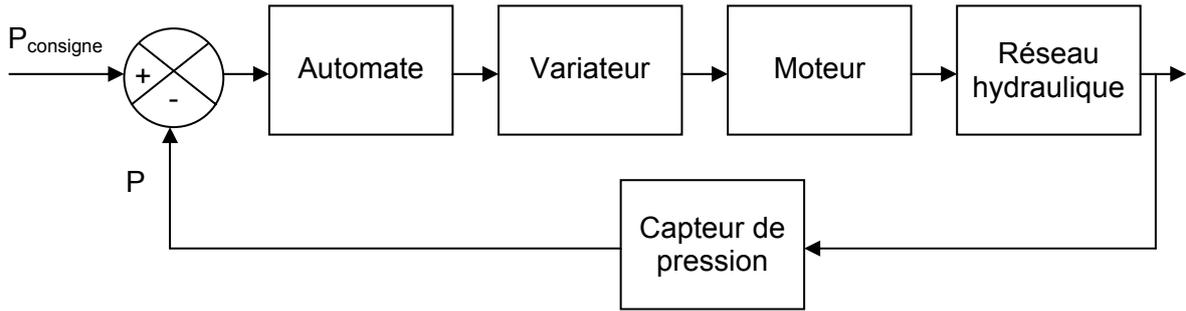
V_1, V_3 et V_4 ouvertes, V_2 et V_5 fermées R_3 fermé, R_1 et R_2 ouverts,
sélecteur MANU/REG sur REG, vitesse variable, régler le niveau à N % calculé comme suit :
20 m correspondant à $P_r = 1,962 \text{ bar}$, $N\% = [1 / 0,8] \cdot [100 - (200 / (P_r + 1))] = 40,6 \%$.

Q33.

Il faut diriger la sortie 4-20 mA du capteur de pression vers l'entrée du régulateur (retirer la résistance de 250Ω existant entre les fils 135 et 101 du folio 02, annexe A5)



Q34.



Q35.

Si le niveau dépasse RN2, il faut injecter de l'air comprimé pour éviter d'asservir en pression avec trop peu d'air, et ne plus asservir du tout si le ballon est rempli d'eau.
 Quand on injecte de l'air comprimé, le niveau baisse. Il faut stopper l'injection d'air comprimé lorsque le niveau bas est atteint : le ballon risque d'être vide annulant ainsi le débit utilisateur.

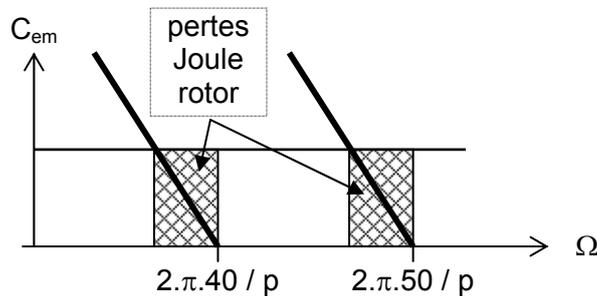
Q36.

r_s représentant la résistance statorique (pertes Joule statoriques)
 R_F : pertes fer statoriques
 R : pertes Joule rotoriques

Q37.

g faible permet de négliger $(L.\omega)^2$ devant $(R/g)^2$.
 $C_{em} = [3.V^2.g/R] / [\omega/p] = [3.V^2.(\omega/p - \Omega) / (\omega/p)] / [R \cdot \omega/p] = (3.p^2/R).(V/\omega)^2.(\omega/p - \Omega)$
 $C_{em} = (3.p^2 / 4.\pi^2 \cdot R).K^2.(\omega/p - \Omega) = \text{constante} \cdot (\omega/p - \Omega)$

Q38.



Q39.

Pour C_{em} donné, les pertes Joule rotor p_{JR} sont constantes.
 Le rendement $\eta = C_{em}.\Omega / (C_{em}.\Omega + \text{pertes})$ va diminuer quand Ω décroît.

Q40.

Pertes fer : diminuent car V diminue ($V/f = \text{constant}$).
 Pertes Joule stator : diminuent un peu à cause de la diminution des pertes fer (le courant magnétisant reste sensiblement le même).
 Les pertes mécaniques diminuent.

Q41. voir DR2

Q42.

valeur moyenne en sortie = $(3.400.\sqrt{2}/\pi) = 540 \text{ V}$ d'où $\hat{I}_1 = (30000 / 540) = 55,55 \text{ A}$

Q43.

$I_{1,h1} = 43,3 \text{ A}$ $I_{1,h5} = 8,7 \text{ A}$ $I_{1,h7} = 6,2 \text{ A}$ $I_{1,h11} = 3,9 \text{ A}$ $I_{1,h13} = 3,3 \text{ A}$

Q44. voir DR2

Q45. $P = 30000 = 550 \cdot (26 / 60) \cdot \hat{I}_{1,mod}$ d'où $\hat{I}_{1,mod} = 125,9 \text{ A}$.

Q46. Le signal résultant est la soustraction de deux signaux ayant la forme de celui proposé en Q43, le premier avec $\alpha = 47^\circ$ et le second avec $\alpha = 73^\circ$. Le calcul donne :

$I_{1,h1} = 44,2 \text{ A}$ $I_{1,h5} = 35,6 \text{ A}$ $I_{1,h7} = 28 \text{ A}$ $I_{1,h11} = 10,7 \text{ A}$ $I_{1,h13} = 2,9 \text{ A}$

Q47.

La valeur crête est élevée quand il n'y a pas de self. Il faudra un contacteur de taille plus élevée : il doit être prévu pour une valeur efficace de $154 / \sqrt{2} = 109 \text{ A}$.

Sans variateur, avec la bêche, chaque moteur absorbe au maximum 40 kW sous $\cos\phi = 0,87$, ce qui donne un courant = 66,4 A. Si le choix des contacteurs n'avait été fait que sur la base d'un moteur de puissance mécanique égale à 45 kW, le courant efficace est alors égal à 84 A.

Quand 3 variateurs sont en service, la valeur crête du courant ne posera pas de problème (saturation) au transformateur car celui-ci est prévu pour 443 A efficace, soit 627 A crête.

Q48. (remarque : P_0 représente les pertes fer et Q_0 la puissance réactive magnétisante car le courant à vide est faible : environ 9,2 A)

$S_{VF} = 3 \cdot (40 / 0,87) = 137,93 \text{ kVA}$ $Q_T = 6,3 + 12,1 \cdot (137,93 / 315)^2 = 8,62 \text{ kVAR}$

$Q_{VF} = 137,93 \cdot \sin(\arccos 0,87) + 8,62 = 76,62 \text{ kVAR}$

pertes = $P_0 + P_{cu} = 0,77 + 4,1 \cdot (137,93 / 315)^2 = 1,56 \text{ kW}$

$P_{VF} = 3 \cdot 40 + \text{pertes} = 121,56 \text{ kW}$

$Q_c = Q_{VF} - (P_{VF} \cdot 0,4) = 28 \text{ kVAR}$

Q49.

$S_{VV} = 3 \cdot (30 / 0,859) = 104,8 \text{ kVA}$

$Q_T = 6,3 + 12,1 \cdot (104,8 / 315)^2 = 7,64 \text{ kVAR}$

$Q_{VF} = 3 \cdot 30 \cdot \text{tg}(\arccos 0,98) + 7,64 = 25,9 \text{ kVAR}$

pertes = $P_0 + P_{cu} = 0,77 + 4,1 \cdot (104,8 / 315)^2 = 1,22 \text{ kW}$

$P_{VF} = 3 \cdot 30 + \text{pertes} = 91,22 \text{ kW}$

$\text{tg}\phi = 25,9 / 91,22 = 0,28$

Q50.

$Z_T = [4 / 100] \cdot [(420)^2 / 315000] = 22,4 \text{ m}\Omega$ $R_T = 6,944 \text{ m}\Omega$ $X_T = 21,28 \text{ m}\Omega$

câble : $R = 23,69 \cdot 15 / 185 = 1,92 \text{ m}\Omega$ $X = 0,09 \cdot 15 = 1,35 \text{ m}\Omega$

$R_R = 0,035 + 6,944 + 1,92 = 8,9 \text{ m}\Omega$

$X_R = 0,35 + 21,28 + 1,35 = 22,98 \text{ m}\Omega$ d'où $L_R = 22,98 / 314 = 73,2 \mu\text{H}$

Q51.

$Q_c = 30000 = 400^2 \cdot C_{comp} \cdot 314$ $C_{comp} = 597 \mu\text{F}$

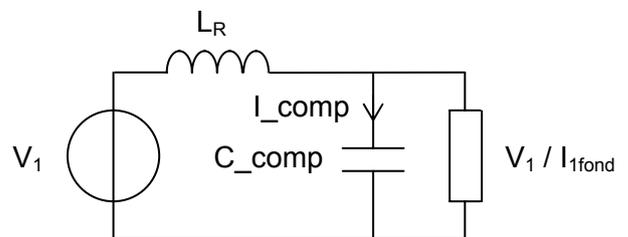
Q52.

$I_{dc} = 30000 / 540 = 55,56 \text{ A}$

Q53.

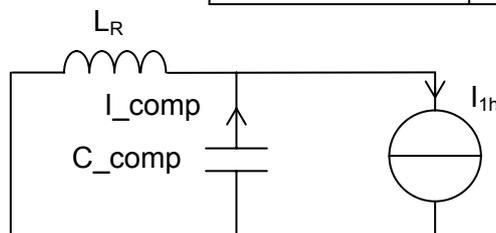
Schéma équivalent à la fréquence du réseau :
La chute de tension dans L_R ($X_R = 22,98 \text{ m}\Omega$) est négligeable.

$I_{comp} = 230 \cdot 597 \cdot 10^{-6} \cdot 314 = 43,1 \text{ A} = 61 / \sqrt{2}$



Q54.

Schéma équivalent aux fréquences multiples de celle du réseau :



Q55.

$$I_{\text{comp}} = I_{1h} \cdot Y_{C_{\text{comp}}} / (Y_{C_{\text{comp}}} + Y_{L_R}) = I_{1h} \cdot j \cdot C_{\text{comp}} \cdot h \cdot \omega / j \cdot [C_{\text{comp}} \cdot h \cdot \omega - (1 / L_R \cdot h \cdot \omega)]$$

$$I_{\text{comp}} = I_{1h} \cdot [1 / 1 - (1 / L_R \cdot C_{\text{comp}} \cdot h^2 \cdot \omega^2)]$$

Q56.

Par calcul, en travaillant avec les valeurs crêtes :

$$\hat{I}_{\text{comp},5} = 28 \cdot 0,12 = 3,38 \quad \hat{I}_{\text{comp},7} = 12 \cdot 0,27 = 3,22 \quad \hat{I}_{\text{comp},11} = 4 \cdot 1,09 = 4,36$$

$$\hat{I}_{\text{comp},13} = 3 \cdot 2,69 = 8,06 \quad \hat{I}_{\text{comp},17} = 4,5 \cdot 5,06 = 22,77 \quad \hat{I}_{\text{comp},19} = 2,5 \cdot 2,8 = 6,99$$

On retrouve ces valeurs dans le spectre.

$$(I_{\text{comp}})^2 = 43,1^2 + (1/2) \cdot (3,38^2 + 3,22^2 + 4,36^2 + 8,06^2 + 22,77^2 + 6,99^2) = 2194$$

$$I_{\text{comp}} = 46,8 \text{ A}$$

Q57.

$1 / 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_R \cdot C_{\text{comp}}} = 761 \text{ Hz}$. L'harmonique la plus proche et d'amplitude la plus élevée est à 850 Hz (rang 17), d'où la superposition d'une sinusoïde de fréquence 850 Hz.

Q58.

La valeur efficace pour laquelle sont normalement prévus les condensateurs est de 43,1 A

Avec un variateur en service, cela représente une augmentation de 8,6 %, valeur qui accélérera la vieillissement des condensateurs. La situation sera encore plus critique si d'autres variateurs sont mis en service en conservant cette batterie de condensateurs.

Q59.

$$Q = 12500 = U^2 / [L_{\text{ah}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 - (1 / C_{\text{comp}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50)] \text{ et } C_{\text{comp}} \cdot L_{\text{ah}} \cdot (2 \cdot \pi \cdot 135)^2 = 1$$

$$C_{\text{comp}} = 214,7 \mu\text{F} \quad \text{et} \quad L_{\text{ah}} = 6,47 \text{ mH}$$

Q60.

On remarque la quasi disparition des courants harmoniques.

$$\text{Le courant efficace} = (12500 / 3) / (230) = 18,1 \text{ A}$$

$$\text{On retrouve bien cette valeur sur le spectre : } 18,1 \cdot \sqrt{2} = 25,6 \text{ A}$$

Q61.

Redresseurs dodécaphasés, filtres anti-harmoniques, filtres actifs et redresseurs à absorption sinusoïdale.

Q62.

$$V_+ = \frac{3}{2 \cdot \pi} \cdot \int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{3}} \frac{\pi}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin \theta \cdot d\theta = \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{2 \cdot \pi} \cdot U = 270 \text{ V}$$

$$V_- = -270 \text{ V}$$

$$U_{\text{cont}} = V_+ - V_- = 540 \text{ V}$$

Q63.

$$u_{BC} = +U_{\text{cont}} : T_3 \text{ et } T_6 \quad v_B = V_+ \text{ et } v_C = V_-$$

$$u_{BC} = -U_{\text{cont}} : T_4 \text{ et } T_5 \quad v_B = V_- \text{ et } v_C = V_+$$

Q64.

$$u_{BC} = 0 : T_3 \text{ et } T_5 \quad \text{ou} \quad T_4 \text{ et } T_6$$

$$\text{Si } u_{AB} = +U_{\text{cont}} \quad \text{alors} \quad v_B = v_C = V_-$$

$$\text{Si } u_{AB} = -U_{\text{cont}} \quad \text{alors} \quad v_B = v_C = V_+$$

$$\text{Si } u_{AB} = 0 \quad \text{alors} \quad v_B = v_C = V_+ \quad \text{ou} \quad v_B = v_C = V_-$$

Q65. Voir DR3

Q66.

Soit Z l'impédance d'un enroulement statorique.

$$V_O = \frac{\frac{V_A}{Z} + \frac{V_B}{Z} + \frac{V_C}{Z}}{\frac{1}{Z} + \frac{1}{Z} + \frac{1}{Z}} = \frac{V_A + V_B + V_C}{3}$$

Q67. Voir DR3

Q68.

Tension v_0 : on retrouve bien les 4 niveaux de tension : V_+ , $1/3 V_+$, $1/3 V_-$, V_- .

La période de v_0 et de v_A est d'environ $330 \mu\text{s}$, correspondant à une fréquence de découpage du variateur de 3 kHz.

L'ondulation basse fréquence sur v_A provient du filtrage imparfait de la tension redressée.

On retrouve les mêmes amplitudes crête à crête pour v_0 et v_A : entre 540 V et 560 V.

Le courant dans le PE, de type oscillatoire amorti, peut atteindre 8 A. La fréquence de répétition de ces impulsions de courant est 6 fois plus élevée que la fréquence de découpage du variateur.

Q69.

Utiliser en sortie un filtre LC appelé aussi filtre sinus, sinon placer des selfs de mode commun en sortie.

Q70.

Remplacer le disjoncteur différentiel par un modèle immunisé contre les courants HF (ex. type A_{si} chez Schneider).

Utiliser un transformateur d'isolement et créer un régime de neutre TNS au secondaire en évitant d'installer des prises de courant en aval de ce transformateur.

Q71.

Ces courants circulant dans les câbles et le PE rayonnent des ondes électromagnétiques perturbant le voisinage : problème de compatibilité électromagnétique.

Q72.

Maîtrise d'ouvrage : exploitant gérant l'alimentation en eau potable

Maîtrise d'œuvre : service chargé des travaux

Les étudiants ne peuvent être que sous traitant du maître d'œuvre, car la dimension service après vente est absente.

Q73.

Convention d'étude et de réalisation établie entre l'entreprise (service chargé des travaux) et le lycée.

Conventions de stage pour les étudiants permettant leur couverture lors des déplacements sur le site.

Autorisations de sortie du lycée.

Q74.

Il représente les tâches pour lesquelles aucun retard ne doit être admis sous peine de ne pas terminer le projet dans les temps.

La somme de la durée des tâches à laquelle il faut ajouter les délais de livraison est égale à 188 heures.

Q75. Voir DR4.

Le planning proposé tient compte de la charge hebdomadaire de chaque étudiant, en regard des tâches que chacun effectuera selon DR5. Il se déroule sur 192 heures.

Q76. Voir DR5.

Q77.

La première revue de projet peut se situer avant la validation des devis par le client : aux alentours de la 50^{ème} heure.

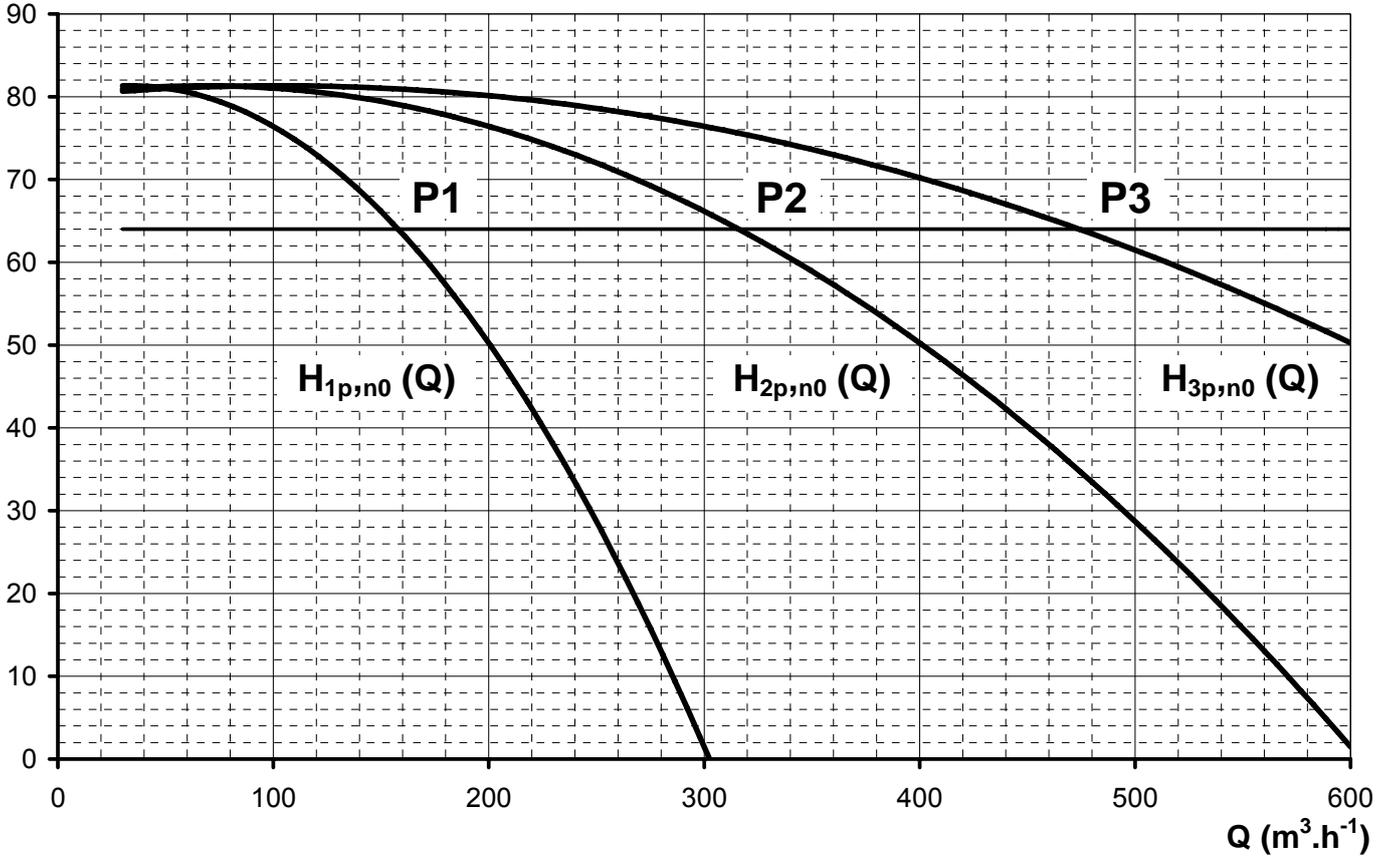
La seconde revue de projet peut se situer autour de la 100^{ème} heure : après la planification des essais, l'étude des paramètres du variateur et la validation des travaux à effectuer par les agents.

La troisième revue de projet peut se situer autour de la 170^{ème} heure : juste avant la mise en service avec le client.

DOCUMENT RÉPONSE DR1

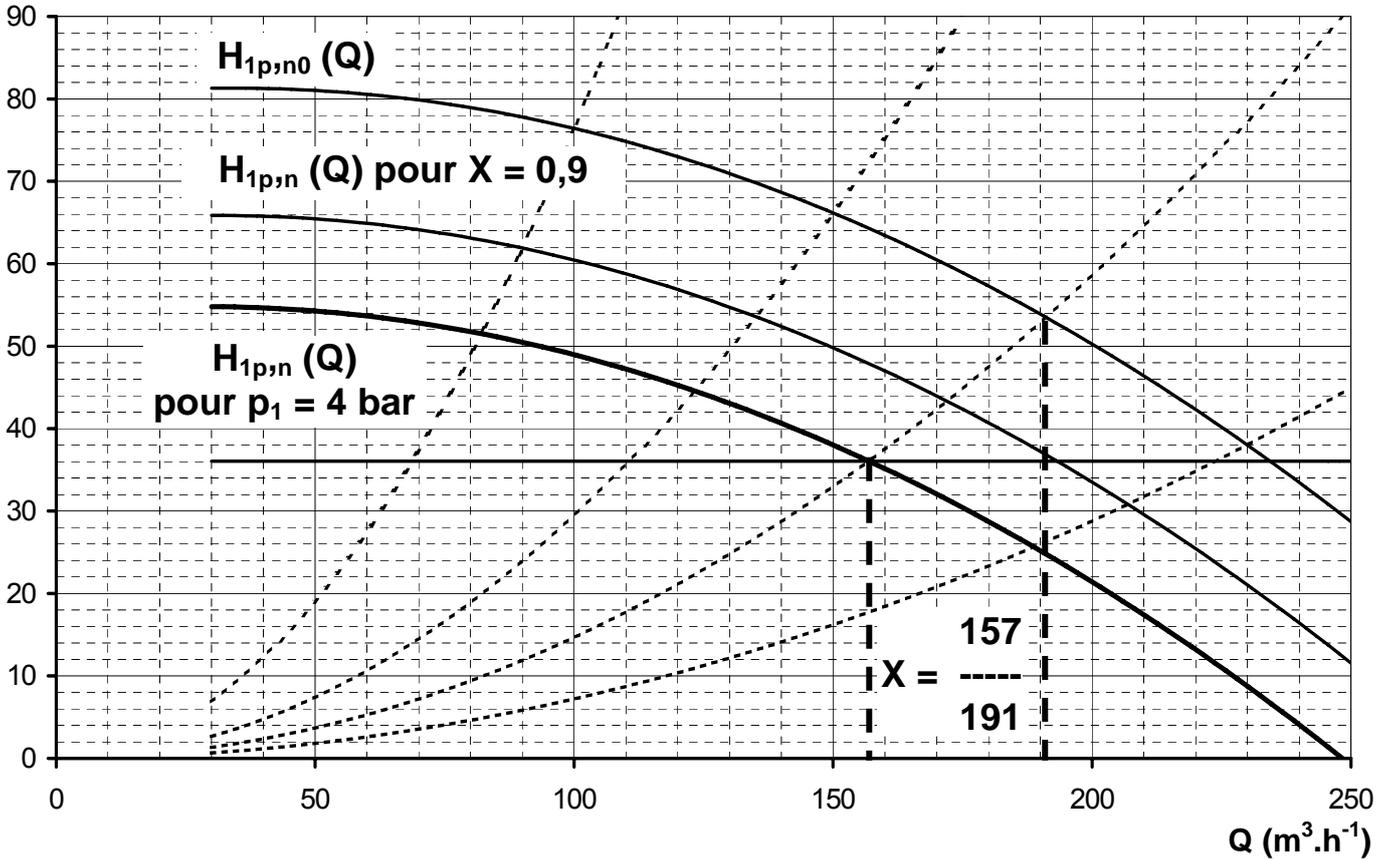
H (m)

Q3.



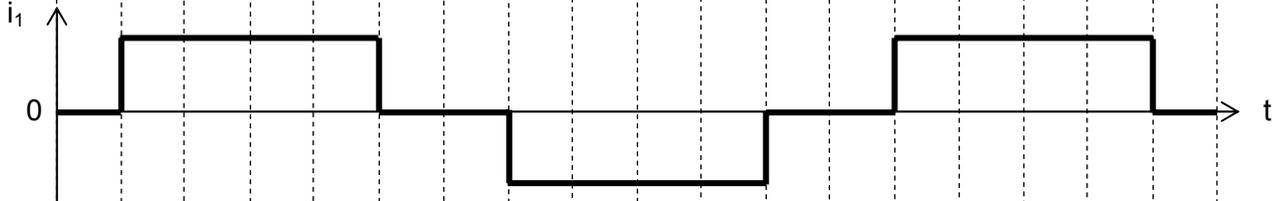
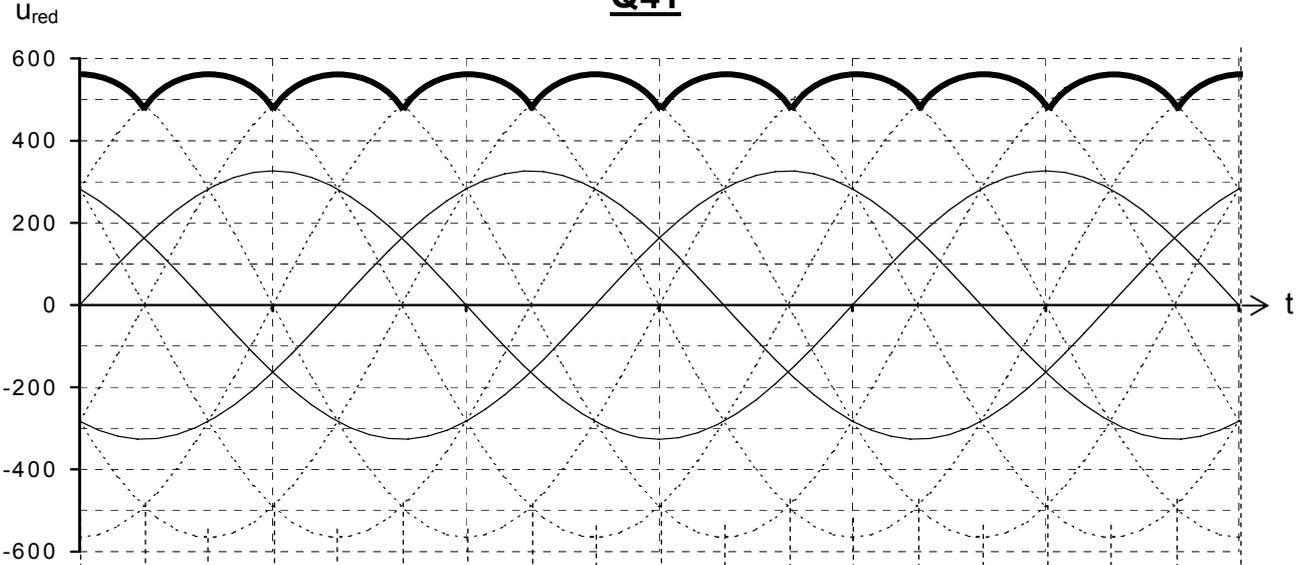
H (m)

Q10.

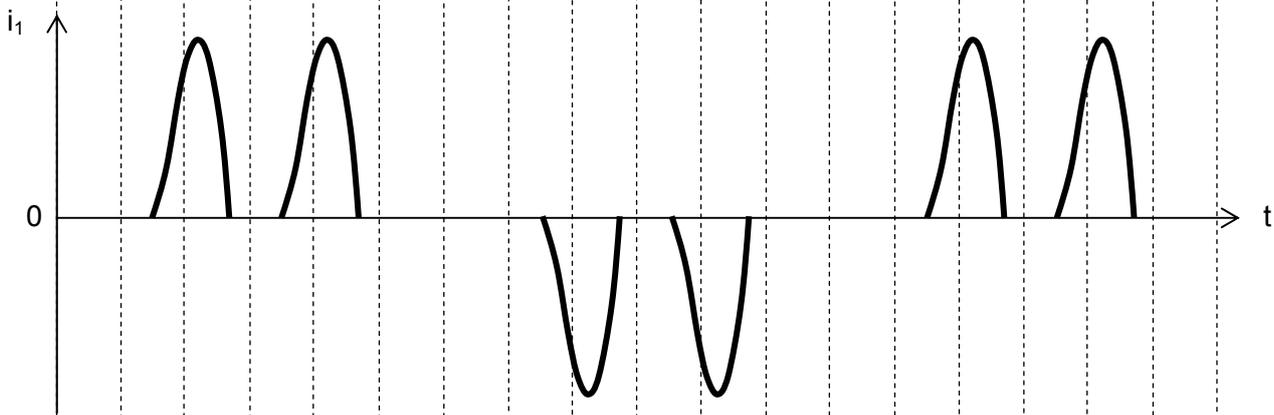
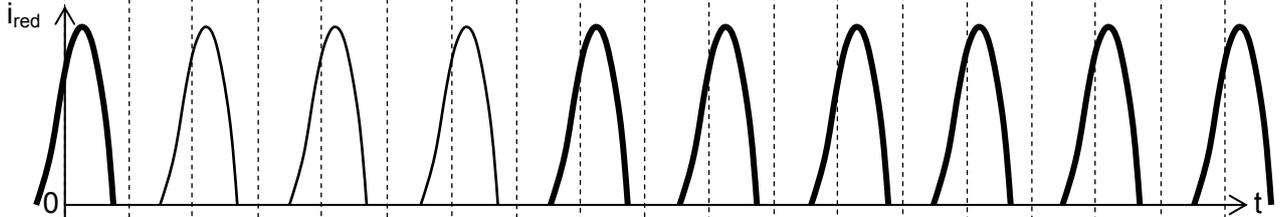


DOCUMENT RÉPONSE DR2

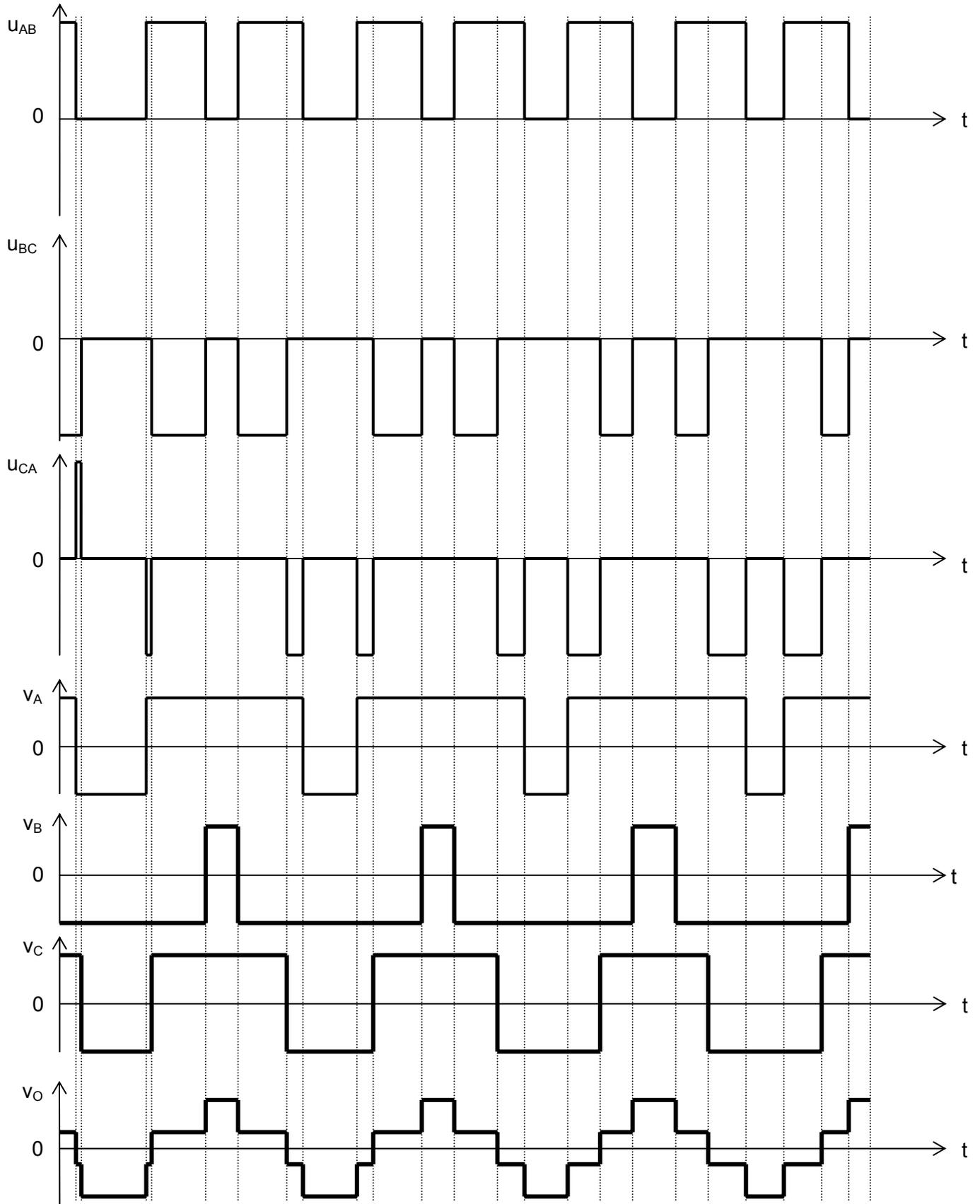
Q41



Q44



DOCUMENT RÉPONSE DR3



DOCUMENT RÉPONSE DR5

	Étudiant 1	Étudiant 2	Étudiant 3
Étude technique et économique			
Analyse du cahier des charges			
T1 : contact initial sur le site	4	4	4
T2 : analyse du mode château d'eau sans bache (mode 1)	8	8	8
T3 : analyse du mode surpresseur (mode 2)	8	8	8
Concevoir des solutions techniques			
T4 : détermination de la puissance du variateur	4	4	4
T5 : environnement variateur	12	12	12
T14 : choix des câbles de puissance		4	
T15 : disjoncteur de tête		4	
T19 : choix armoire et plan d'implantation interne	8		8
T20 : étude thermique armoire			4
T29 : choix capteur de pression et câble de liaison	4		
T8 : recherche des paramètres variateur pour le mode 1	4	12	12
T9 : recherche des paramètres variateur pour le mode 2	4	12	12
Élaboration d'une offre adaptée			
T6 : devis variateur	4		
T16 : devis câbles (et disjoncteur éventuel)		4	
T21 : devis armoire			4
T30 : devis capteur	4		
Dossiers de fabrication et d'exécution d'un chantier			
T17 : schéma implantation câbles sur site		4	
T24 : schéma d'implantation armoire sur site			4
T31 : schéma d'implantation capteur sur site	4		
T33 : schémas électriques réalisés sous logiciel	24		
Réalisation et exécution			
T22 : préparation et câblage armoire (hors variateur)		16	16
T7 : câblage variateur au lycée	16		
T25 : montage armoire sur site	12	12	12
Planification, suivi technique et maîtrise des coûts			
T26 : planification des essais de l'armoire sur site	4	4	4
Centraliser les commandes et en assurer le suivi			16
Essais, mise en service et contrôle			
T23 : vérification câblage général (au lycée)	4	4	4
T10 : essais et paramétrage variateur au lycée	8	8	8
T18 : vérification câblage sur site		4	
T32 : essais du capteur sur site	4		
T27 : vérification électriques armoire sur site	4	4	4
T11 : essais variateur sur site (présence du fournisseur)	8	8	8
T12 : essais hydrauliques sur site	8	8	4
T28 : vérification thermique armoire sur site			4
T13 : comptes rendus d'essais	8	8	8
Relations clients - fournisseurs			
T34 : validation des devis par le client et commande	4	4	4
T35 : validation des travaux demandés aux agents	4	4	4
Réunions de chantier : organisation et comptes rendus		16	
TOTAL	176	176	176

Rapport sur la première épreuve de l'agrégation interne de génie électrique 2006 prenant appui sur un système industriel (8 heures)

Partie A : étude du fonctionnement de la station

Cette partie a été abordée par une grande majorité des candidats, même si certains ont eu du mal à exploiter tous les éléments fournis dans le sujet. Les connaissances scientifiques de base de nombreux candidats étaient insuffisantes pour exploiter les formules de mécanique des fluides, pourtant toutes fournies. Peu de candidats ont traité l'ensemble des modes de fonctionnement de l'installation, nuisant ainsi à la bonne compréhension globale du système. Trop peu de candidats maîtrisent le comportement d'un moteur asynchrone en vitesse variable. Beaucoup d'entre eux ont des difficultés à se représenter la chaîne de conversion d'énergie d'un système, ce qui a conduit à constater de graves erreurs dans l'estimation des puissances. Par ailleurs – en ce qui concerne les exploitations pédagogiques – les explications trop succinctes n'ont pas fait apparaître la méthodologie des mesurages ainsi que le choix pertinent des appareils.

Partie B : étude de l'alimentation électrique de la station

La partie B1 – analyse du courant en amont du variateur – a été traitée par la majorité des candidats. Les formes d'ondes ont été pour l'essentiel correctement présentées. Trop de candidats éprouvent des difficultés à appliquer une relation fournie dans le sujet. Certains ne savent pas qu'il n'y a pas d'harmoniques de courant multiples de 3 dans un système triphasé sans neutre.

La partie B2 – Incidence sur les condensateurs de relèvement du facteur de puissance – a été moins traitée que la partie précédente. De nombreux candidats confondent le facteur de puissance et facteur de déplacement ($\cos\phi$) et ne savent pas résoudre un problème lié à la distribution : calcul d'impédance de ligne, etc. Les modèles simples d'un système électrique mettant en œuvre une charge non linéaire sont mal connus, par conséquent l'exploitation des simulations de ces systèmes est mal traitée.

Le peu de candidats qui ont abordé la partie B3 – analyse des courants haute fréquence dans l'installation –, n'ont pas su correctement établir les formes d'ondes demandées.

Partie C : planification des travaux de modification

Trop peu de candidats ont abordé ce questionnement pourtant au cœur de la démarche de projet des BTS électrotechnique. Les documents d'aide pour traiter pour le projet la planification des travaux ainsi que la répartition des contrats des étudiants ont été très incomplètement remplis. Les informations et documents d'accompagnement indispensables pour le bon déroulement d'un projet en partenariat avec l'entreprise doivent être obligatoirement précisés avec le plus grand soin. Les certificats d'habilitation de chacun des étudiants du projet clairement défini par un cahier des charges font partie des documents contractuels indispensable à produire. Les conventions de stage ainsi que les annexes techniques et financières spécifiques au projet doivent préciser le cadre d'intervention des étudiants et professeurs en lien avec l'entreprise.

AGRÉGATION

SESSION 2006

CONCOURS INTERNE

Section : GÉNIE ÉLECTRIQUE

Option A : ÉLECTRONIQUE ET INFORMATIQUE INDUSTRIELLE
Option B : ÉLECTROTECHNIQUE ET ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE

ÉTUDE D'UN PROBLÈME D'AUTOMATISATION

DURÉE : 6 HEURES, COEFFICIENT : 1

Aucun document n'est autorisé.

*Calculatrice autorisée (conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999)
Convertisseur en Euro autorisé*

LIGNE DE TRANSPORT D'ÉNERGIE

Ce sujet comporte 3 dossiers distincts :

📁 Dossier de présentation, texte du sujet avec le travail demandé	19 pages
📁 Documents annexes	4 pages
📁 Documents réponses N°1 à 15	9 pages

Ce sujet comporte six parties indépendantes :

- Partie **A** : contrôle de l'énergie.
- Partie **B** : modélisation du câble.
- Partie **C** : régulation simplifiée du courant de ligne.
- Partie **D** : modèle de la station 1
- Partie **E** : modèle d'état de la boucle de courant et régulation du courant de ligne.
- Partie **F** : régulation de la tension de sortie de la station 1.

Une lecture préalable et complète du sujet est indispensable.

Il sera tenu compte de la cohérence avec laquelle les candidats traiteront chaque partie, le jury préférant une réflexion d'ensemble de la partie abordée à un éparpillement des réponses.

Les candidats sont invités à numéroter chaque page de leur copie et à indiquer clairement le numéro de la question traitée.

Les candidats sont priés de rédiger les différentes parties du problème sur feuilles séparées et clairement repérées. Chaque question est identifiée par une police **gras** et repérées par un numéro.

Il leur est rappelé qu'ils doivent utiliser les notations propres au sujet, présenter clairement les calculs et dégager ou encadrer tous les résultats.

Tout résultat incorrectement exprimé ne sera pas pris en compte. En outre les correcteurs leur sauront gré d'écrire lisiblement et de soigner la qualité de leur copie.

Il sera tenu compte de la qualité de rédaction, en particulier pour les réponses aux questions ne nécessitant pas de calcul. Le correcteur attend des phrases complètes respectant la syntaxe de la langue française.

Pour la présentation des applications numériques, il est rappelé que lors du passage d'une forme littérale à son application numérique, il est recommandé aux candidats de procéder comme suit :

- après avoir rappelé la relation littérale, chaque grandeur est remplacée par sa valeur numérique en respectant la position qu'elle avait dans la relation puis le résultat numérique est donné sans calculs intermédiaires et sans omettre son unité.

Si le texte du sujet, de ses questions ou de ses annexes, vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, il vous est demandé de la (ou les) mentionner explicitement dans votre copie.

Liaison de transport d'énergie SVC HVDC sur l'île de Gotland (Suède)

L'île de Gotland en Suède est située au milieu de la mer Baltique. Jusqu'en 1999, la totalité de l'énergie électrique était apportée sur l'île, à partir de suède par l'intermédiaire d'une liaison à courant continu.

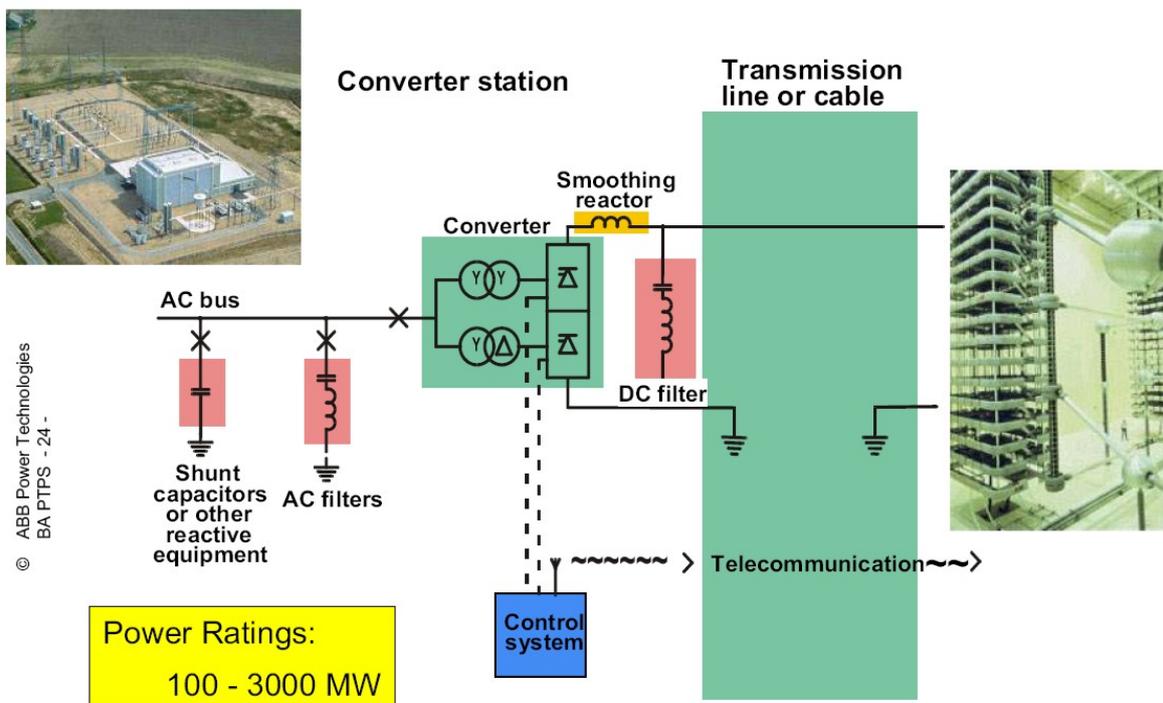
Cette liaison à courant continu (Gotland 1) fut la première ligne commerciale installée au monde (1954). D'une longueur de 90 km, elle reliait le continent à l'île par l'intermédiaire de deux câbles sous-marins. L'exploitation en 1954 a débuté avec une tension nominale de 100 kV (valves à vapeur de mercure) et une capacité de transport de 20 MW. L'ajout de valves à thyristor en 1970 (première mondiale à nouveau) a permis d'élever la tension continue à 150 kV, et d'augmenter la capacité de transport à 30 MW.

La liaison a été doublée par l'installation d'un nouveau câble entre les villes de Västervik (continent) et Ygne (île de Götland) en 1983 (Gotland 2). La tension nominale était de 150 kV, et la capacité de transport de la ligne supplémentaire a été portée à 130 MW grâce à l'utilisation exclusive de valves à thyristors.

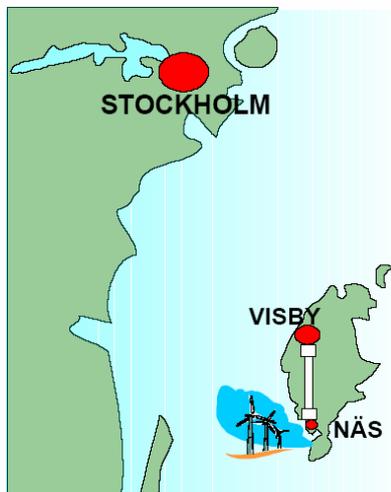
Les besoins en électricité de l'île augmentant, il a fallu, en 1985 mettre en place une troisième liaison de transport à courant continu haute tension (HVDC), Gotland 3. La capacité totale de transport atteint maintenant 260 MW. La première liaison, Gotland 1 a été mise hors service et démontée.



Le principe d'une liaison HVDC est décrit à la figure ci-dessous. La commutation des thyristors est assistée par le réseau alternatif à la fréquence de 50 Hz.



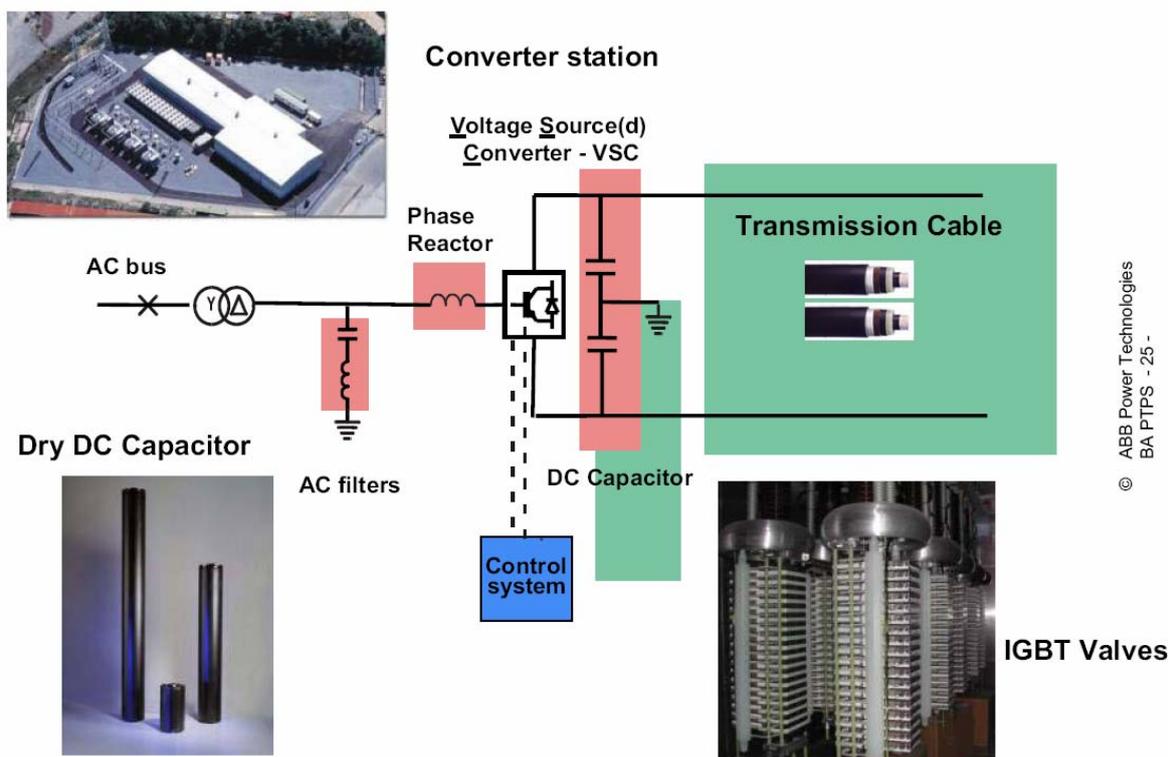
Le développement des énergies renouvelables a permis l'installation sur le sud de l'île de fermes éoliennes. Les infrastructures de transport d'énergie sur l'île ne pouvant absorber le surcroît de production, il a été nécessaire d'accroître la capacité de transport de l'énergie sur l'île, tout en acceptant les fluctuations importantes d'alimentation imposées par les conditions de fonctionnement variables des éoliennes. Un site naturel protégé sur l'île empêchait toute construction supplémentaire de lignes aériennes. Dans ces conditions, une ligne de transport d'énergie souterraine à courant continu a été installée entre les villes de Näs (à proximité des fermes éoliennes) et Visby (station de Bäcks).



Pour notamment améliorer la stabilité du réseau de l'île, et réduire la taille des stations de conversion d'énergie, une nouvelle forme de ligne de transport à courant continu a été développée : SVC (Static Voltage Converter) HVDC (High Voltage Direct Current).

Ce sont maintenant des IGBT qui sont utilisés à la place des valves à thyristors, et qui permettent par une fréquence de commutation plus élevée de réduire très significativement la taille des filtres habituellement installés sur les lignes classiques HVDC à thyristors.

La ligne a été inaugurée en 1999, elle a une capacité de 50 MW. Deux câbles sous-terrains de 80 kV relient les terminaux distants de 70 km. La figure ci-dessous montre le principe d'une liaison SVC HVDC utilisant des valves à IGBT.



Les photos ci-dessous montrent la station de Näs et les fermes éoliennes en arrière plan.

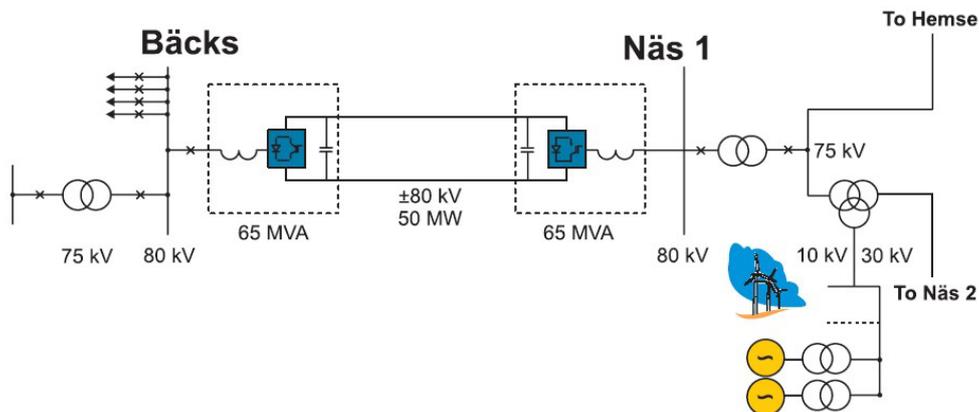


Les principaux intérêts d'une liaison SVC HVDC par rapport à une liaison HVDC utilisant des valves à thyristors peuvent être résumés ainsi :

- Réduction de la taille des filtres réseau
- Suppression des inductances de filtrage sur la ligne à courant continu
- Réduction des ondulations de tension et de courant sur la ligne à courant continu
- Contrôle indépendant des puissances actives et réactives, avec comme conséquence la possibilité de stabiliser le réseau alternatif
- Pas de besoin de synchronisation entre les stations

C'est sur une liaison de transport à courant continu de ce type que porte le sujet et principalement sur une des deux stations.

Les caractéristiques de la liaison SVC HVDC étudiée sont décrites dans la figure ci-dessous :



La fréquence des réseaux alternatifs est de 50 Hz.

Le sujet se décompose en 6 parties indépendantes :

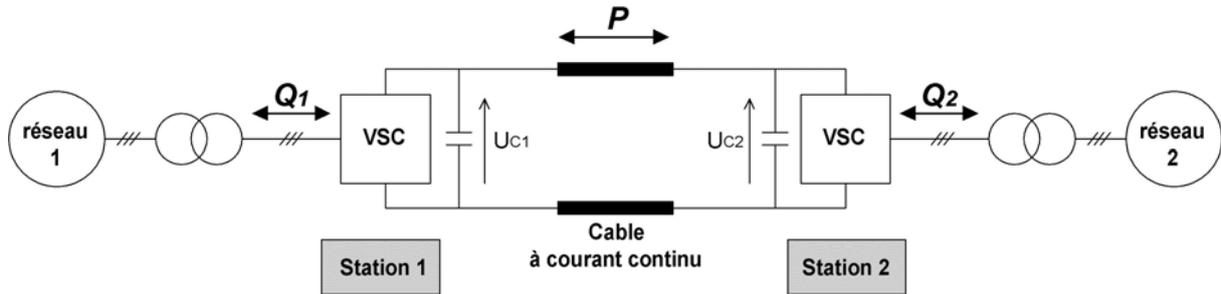
- L'objectif de la partie A est de définir les limites de fonctionnement en puissance et puissance réactive de la liaison de transport.
- La partie B est consacrée à la modélisation « haute fréquence » du câble.
- La partie C qui est à traiter impérativement, concerne l'étude d'une boucle de régulation de courant. Cette boucle de régulation permet indirectement de tenir compte des besoins en puissance active et réactive.
- La partie D est une modélisation de l'onduleur préparant à l'étude de la régulation par retour d'état (partie E). Ce travail ne nécessite aucune connaissance préalable de la transformation de Park pour être mené à son terme.
- La partie E concerne l'étude de l'asservissement de courant par retour d'état.
- La partie F porte sur la régulation de tension à la sortie de l'onduleur de la station 1.

Le candidat pourra aborder les six parties dans un ordre quelconque, néanmoins un effort de présentation est nécessaire pour la compréhension des réponses.

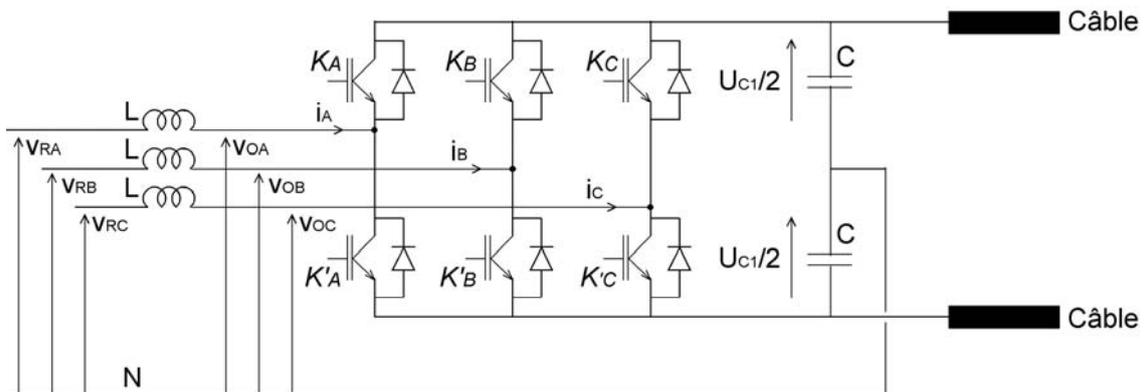
(1) Partie A : contrôle de l'énergie

La structure générale d'une liaison SVC HVDC entre deux stations de conversion connectées à deux réseaux triphasés est indiquée à la figure suivante.

On note P la puissance transmittant sur le câble, et Q1 et Q2, les puissances réactives au niveau des stations 1 et 2.



Les onduleurs de tension commandés (VSC) assurant la conversion AC/DC sont totalement réversibles en puissance. Une structure simplifiée est représentée à la figure suivante. Le convertisseur nécessite trois inductances sur le réseau alternatif pour limiter les ondulations de courant réseau et des condensateurs sur le bus continu pour filtrer la tension de la liaison. Chaque IGBT représenté sur la figure est en réalité constitué de plusieurs IGBT connectés en série et éventuellement en parallèle pour supporter les contraintes en tension et en courant



Les tensions v_{RA} , v_{RB} , v_{RC} sont imposées par le réseau et forment un système de tensions triphasées directes, que nous supposons être équilibrées.

Notations temporelles :

$$v_{RA}(t) = V_R \sqrt{2} \cos(\theta)$$

$$v_{RB}(t) = V_R \sqrt{2} \cos(\theta - 2\pi/3)$$

$$v_{RC}(t) = V_R \sqrt{2} \cos(\theta + 2\pi/3)$$

Notations complexes :

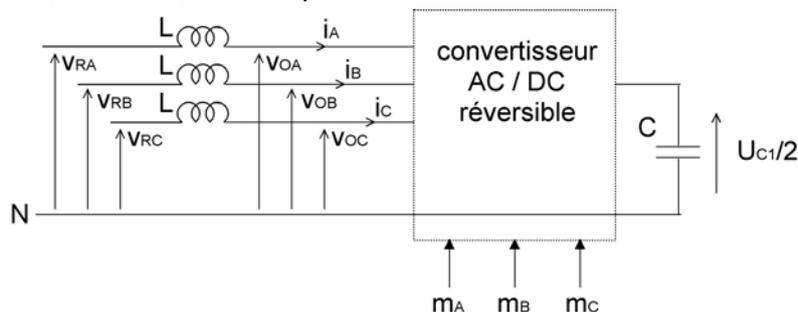
$$\underline{V}_{RA} = V_R$$

$$\underline{V}_{RB} = V_R \times e^{-j2\pi/3}$$

$$\underline{V}_{RC} = V_R \times e^{j2\pi/3}$$

avec $\theta = \omega t$, ω étant la pulsation du réseau alternatif

L'onduleur fonctionne en modulation de largeur d'impulsion et il ne sera pas étudié dans ce problème. Nous considérerons par la suite que la fréquence de découpage est suffisamment élevée pour pouvoir considérer les tensions v_{OA} , v_{OB} , v_{OC} comme parfaitement sinusoïdales.



Nous supposons donc que l'onduleur permet de générer, à partir d'une tension continue, les tensions V_{OA} , V_{OB} , V_{OC} qui seront assimilées à un réseau de tensions parfaitement sinusoïdales.

Les grandeurs de commande seront notées m_A , m_B et m_C .

En notant ψ le déphasage entre tensions simples réseau et tension simple d'une même phase de l'onduleur, on obtient :

Notations temporelles :

$$v_{OA}(t) = V_O \sqrt{2} \cos(\theta - \psi)$$

$$v_{OB}(t) = V_O \sqrt{2} \cos(\theta - 2\pi/3 - \psi)$$

$$v_{OC}(t) = V_O \sqrt{2} \cos(\theta + 2\pi/3 - \psi)$$

Notations complexes :

$$\underline{V_{OA}} = V_O \times e^{-j\psi}$$

$$\underline{V_{OB}} = V_O \times e^{-j2\pi/3} \times e^{-j\psi}$$

$$\underline{V_{OC}} = V_O \times e^{j2\pi/3} \times e^{-j\psi}$$

Les tensions v_{OA} , v_{OB} , v_{OC} à l'entrée de l'onduleur seront imposées par la tension continue U_{C1} de la liaison et les grandeurs de commande m_A , m_B et m_C , par les relations suivantes :

$$v_{OA}(t) = m_A(t) \frac{U_{C1}}{2}$$

$$v_{OB}(t) = m_B(t) \frac{U_{C1}}{2}$$

$$v_{OC}(t) = m_C(t) \frac{U_{C1}}{2}$$

Dans ces conditions, nous supposons également que les courants réseau i_{RA} , i_{RB} , i_{RC} sont parfaitement sinusoïdaux, et qu'ils forment un système de courant triphasés équilibrés. On note φ le déphasage entre courant de ligne et tension simple réseau, de sorte que les courants réseau s'écrivent :

Notations temporelles :

$$i_{RA}(t) = I_R \sqrt{2} \cos(\theta - \varphi)$$

$$i_{RB}(t) = I_R \sqrt{2} \cos(\theta - 2\pi/3 - \varphi)$$

$$i_{RC}(t) = I_R \sqrt{2} \cos(\theta + 2\pi/3 - \varphi)$$

Notations complexes :

$$\underline{I_{RA}} = I_R \times e^{-j\varphi}$$

$$\underline{I_{RB}} = I_R \times e^{-j2\pi/3} \times e^{-j\varphi}$$

$$\underline{I_{RC}} = I_R \times e^{j2\pi/3} \times e^{-j\varphi}$$

Avec les hypothèses formulées ci-dessus, les puissances actives et réactives délivrées par le réseau 1 s'écrivent :

$$P = 3V_R I_R \cos(\varphi)$$

$$Q = 3V_R I_R \sin(\varphi)$$

Nous supposons dans toute la suite que la valeur efficace V_R des tensions simples réseau est constante.

A.1 La station 1 assure le contrôle de la puissance réactive Q_1 et de la tension du bus continu U_{C1} . La station 2, identique en tous points à la station 1 contrôle également la puissance réactive Q_2 absorbée ou fourni au réseau 2. Quelle autre grandeur est nécessairement contrôlée par la station 2 ?

A.2 Donner l'expression temporelle des grandeurs de commande m_A , m_B et m_C en fonction de V_O , ψ , et U_{C1} .

A.3 Quelle est la différence de potentiel entre les deux câbles de la liaison de transport à courant continu ?

A.4 On note I_{RMAX} , le courant efficace réseau maximum limité par la capacité en courant des transistors de l'onduleur ; montrer que pour cette intensité maximale, le point de fonctionnement dans le plan P-Q est un cercle lorsque la tension réseau V_R est constante.

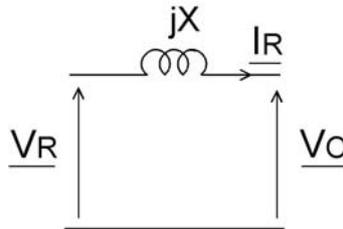
A.5 On donne $V_R = 46$ kV et $I_{RMAX} = 470$ A. Préciser sur le document réponse R1 les valeurs numériques de P_{MAX} et Q_{MAX} .

A.6 Le courant continu maximal dans le câble I_{DCMAX} est de 350 A. Calculer la puissance maximale pouvant transiter dans le câble.

A.7 Compléter alors dans ce cas la feuille de réponse R2 en indiquant les limites de fonctionnement dans le plan P-Q.

A.8 Tracer le diagramme de Fresnel des tensions \underline{V}_R , \underline{V}_O et du courant \underline{I}_R .

La tension \underline{V}_R est prise comme origine des phases, on note $X = L\omega$ la réactance du réseau.



Pour le tracé, on considèrera un courant \underline{I}_R en retard par rapport à \underline{V}_R avec un angle φ compris entre 0 et $\pi/2$.

A.9 À l'aide du diagramme de Fresnel, montrer que l'expression de la puissance réactive peut se mettre sous la forme suivante :

$$Q = 3 \frac{V_R^2}{X} \left(1 - \frac{V_O}{V_R} \cos(\Psi) \right)$$

A.10 Montrer que l'expression de la puissance active peut se mettre sous la forme suivante :

$$P = 3 \frac{V_O V_R}{X} \sin(\Psi)$$

A.11 La tension V_O est limitée à la valeur V_{OMAX} liée à la tension du bus continu. Montrer à partir des deux relations précédentes que dans ces conditions, les limites du point de fonctionnement dans le plan P-Q sont situées sur un cercle. Vous préciserez dans le plan P-Q l'expression des coordonnées du cercle ainsi que son rayon.

On rappelle que dans le plan x-y, l'équation d'un cercle de centre (x_0, y_0) et de rayon R est la suivante :

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = R^2$$

A.12 Faire les applications numériques correspondantes, on prendra $L = 100$ mH, et $V_{OMAX} = 56$ kV.

A.13 Compléter alors la feuille de réponse R3 en indiquant toutes les limites du lieu des points de fonctionnement dans le plan P-Q.

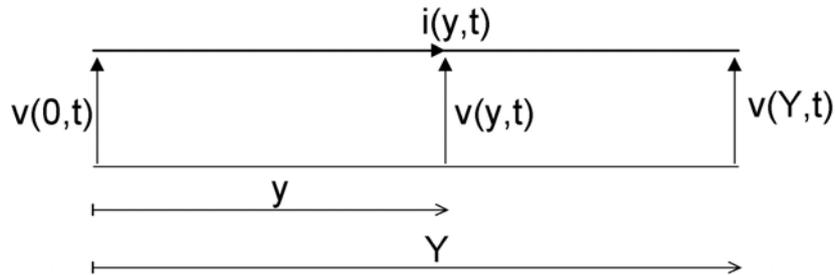
A.14 Indiquer les valeurs numériques des limites en puissance active et réactive.

A.15 Quel est l'intérêt de contrôler la tension du câble au voisinage de sa limite en tension ?

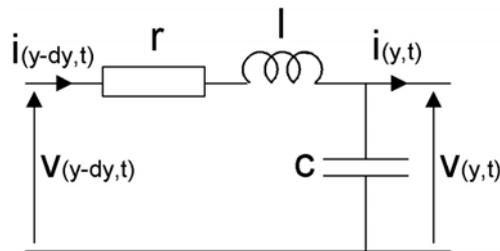
A.16 Quelle est la grandeur de consigne qui sera déduite des consignes en puissance active et réactive ?

Partie B : modélisation du câble

La ligne de transmission de puissance à courant continu de longueur totale notée Y est représentée par R_y , L_y et C_y respectivement résistance, inductance et capacité par unité de longueur. On considèrera par la suite les valeurs numériques suivantes : $R_y = 40 \text{ m}\Omega/\text{km}$, $C_y = 0,3 \text{ }\mu\text{F}/\text{km}$, $L_y = 0,2 \text{ mH}/\text{km}$



à la distance y de l'origine, le modèle d'un tronçon de ligne de longueur dy est indiqué ci-dessous :



B.1 Donner l'expression des éléments r , l et c du tronçon de câble de longueur dy .

B.2 Montrer que les courants et tensions le long de la ligne sont régis par les équations différentielles suivantes (équation des télégraphistes) :

$$\frac{\partial^2 v(y,t)}{\partial y^2} = R_y C_y \frac{\partial v(y,t)}{\partial t} + L_y C_y \frac{\partial^2 v(y,t)}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 i(y,t)}{\partial y^2} = R_y C_y \frac{\partial i(y,t)}{\partial t} + L_y C_y \frac{\partial^2 i(y,t)}{\partial t^2}$$

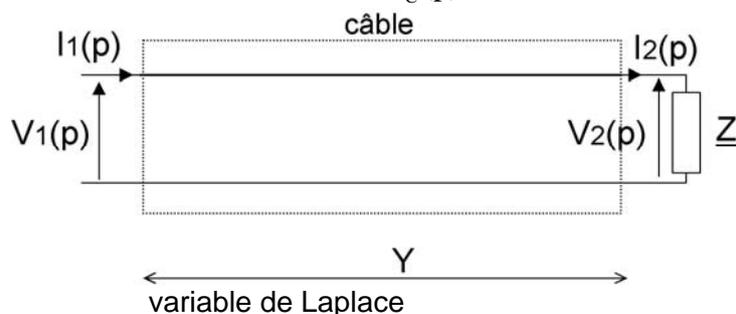
On rappelle que :

$$\frac{\partial v(y,t)}{\partial y} = \frac{v(y,t) - v(y - dy, t)}{dy}$$

Les solutions en régime harmonique de ces équations sont les suivantes pour une ligne de transmission de longueur Y . La ligne est chargée par une impédance $Z(p)$.

$$V_2(p) = V_1(p) \times \cosh(\lambda(p) \times Y) - Z_C(p) \times I_1(p) \times \sinh(\lambda(p) \times Y)$$

$$I_2(p) = I_1(p) \times \cosh(\lambda(p) \times Y) - \frac{V_1(p)}{Z_C(p)} \times \sinh(\lambda(p) \times Y)$$



Avec :

$$Z_C(p) = \sqrt{\frac{R_y + L_y p}{C_y p}}$$

p variable de Laplace

l'impédance caractéristique de la ligne de transmission

$\lambda(p) = \sqrt{C_y p (R_y + L_y p)}$ la constante de propagation
 $\cosh(\)$ et $\sinh(\)$ les cosinus et sinus hyperboliques

B.3 On note $Z(p)$ la charge de la ligne, montrer que la fonction de transfert de la ligne de transmission s'écrit :

$$H(p) = \frac{V_2(p)}{V_1(p)} = \frac{\gamma(p)}{\gamma(p) \times \cosh(\lambda(p) \times Y) + \sinh(\lambda(p) \times Y)}$$

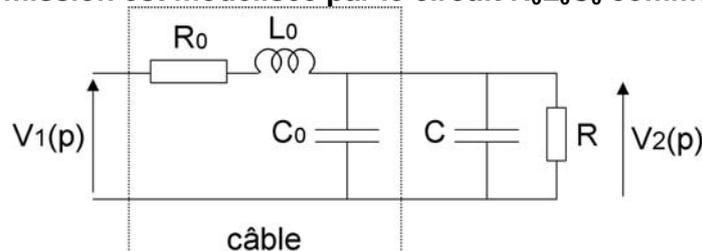
avec $\gamma(p) = \frac{Z(p)}{Z_c(p)}$ et on rappelle que : $\cosh^2(x) - \sinh^2(x) = 1$

B.4 La charge de la ligne est modélisée par une résistance R_L . Déterminer la valeur à donner à cette résistance lorsque la puissance de 50 MW s'écoule sur la ligne.

B.5 Le diagramme de Bode de la ligne de transmission est présenté en Annexe 1 dans le cas d'une charge résistive connectée à l'extrémité de la ligne, commenter ce diagramme et donner la valeur de l'amplification maximale (rapport V_2/V_1 max.).

B.6 En pratique, une capacité est placée aux deux extrémités de la ligne. Le diagramme de Bode de la ligne de transmission est indiqué en Annexe 2 dans le cas d'une charge RC connectée à l'extrémité de la ligne, commenter à nouveau ce diagramme en indiquant l'effet de la capacité, et préciser à nouveau la valeur de l'amplification maximale.

B.7 La ligne de transmission est modélisée par le circuit $R_0 L_0 C_0$ comme indiqué ci-dessous :



Calculer la fonction de transfert $V_2(p)/V_1(p)$ et la mettre sous la forme suivante :

$$\frac{V_2(p)}{V_1(p)} = \frac{K}{1 + \frac{2m}{\omega_0} p + \frac{p^2}{\omega_0^2}}$$

B.8 En considérant les deux câbles de transport de longueur égale à 70 km chacun, soit 140 km au total, déterminer les valeurs de R_0 , L_0 et C_0 .

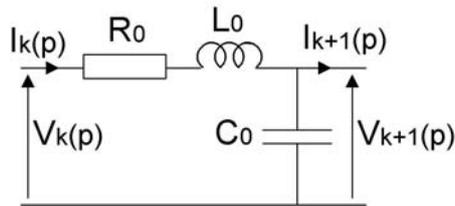
B.9 Donner les expressions du gain K , du facteur d'amortissement m et de la pulsation ω_0 , puis faire les applications numériques. On prendra $C = 50 \mu\text{F}$ et $R = 512 \Omega$.

B.10 Tracer sur la feuille de réponse R4 l'allure du gain (en dB), en précisant sur la feuille de réponse les quatre valeurs numériques suivantes : le gain à pulsation nulle, le gain maximal et la pulsation correspondante ainsi que la pente exprimée en dB par décade lorsque $\omega \gg \omega_0$.

On rappelle que pour la transmittance définie par, $G(p) = \frac{1}{1 + \frac{2m}{\omega_0} p + \frac{p^2}{\omega_0^2}}$

le facteur de résonance Q s'écrit : $Q = \frac{1}{2m\sqrt{1 - m^2}}$

B.11 On cherche maintenant à modéliser la ligne de transmission par un nombre fini de cellules RLC. Chaque cellule RLC représente une longueur L/N du câble, L étant la longueur totale du câble et N le nombre de cellules élémentaires. On notera R_0 , L_0 et C_0 les éléments de ces cellules élémentaires.

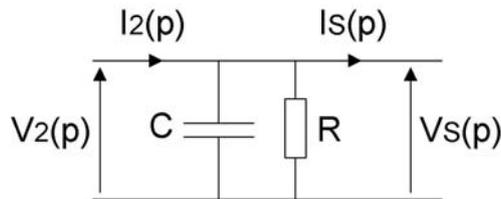


Écrire les éléments $A_{11}(p)$, $A_{12}(p)$, $A_{21}(p)$ et $A_{22}(p)$ de la matrice de transfert notée $[A]$ du quadri-pôle ainsi constitué telle que :

$$\begin{bmatrix} V_{k+1}(p) \\ I_{k+1}(p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11}(p) & A_{12}(p) \\ A_{21}(p) & A_{22}(p) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_k(p) \\ I_k(p) \end{bmatrix}$$

avec $[A] = \begin{bmatrix} A_{11}(p) & A_{12}(p) \\ A_{21}(p) & A_{22}(p) \end{bmatrix}$

B.12 La charge à l'extrémité du câble est constituée d'un condensateur associé à une résistance en parallèle :



Écrire la matrice de transfert de la charge de la ligne, on notera $[B]$ cette matrice.

$$\begin{bmatrix} V_s(p) \\ I_s(p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11}(p) & B_{12}(p) \\ B_{21}(p) & B_{22}(p) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_2(p) \\ I_2(p) \end{bmatrix}$$

avec $[B] = \begin{bmatrix} B_{11}(p) & B_{12}(p) \\ B_{21}(p) & B_{22}(p) \end{bmatrix}$

B.13 Écrire la matrice de transfert de la ligne notée $[L]$ à l'aide des matrices $[A]$ et $[B]$, telle que :

$$\begin{bmatrix} V_s(p) \\ I_s(p) \end{bmatrix} = [L] \times \begin{bmatrix} V_1(p) \\ I_1(p) \end{bmatrix}$$

B.14 En constatant que $I_s(p)$ est nul, écrire la fonction de transfert de la ligne notée $HL(p)$, à l'aide des éléments $L_{11}(p)$, $L_{12}(p)$, $L_{21}(p)$, $L_{22}(p)$ de la matrice de transfert totale $[L]$ avec :

$$HL(p) = \frac{V_s(p)}{V_1(p)}$$

On notera : $[L] = \begin{bmatrix} L_{11}(p) & L_{12}(p) \\ L_{21}(p) & L_{22}(p) \end{bmatrix}$

B.15 Les annexes 3 et 4 montrent les diagrammes de Bode de la fonction de transfert $HL(p)$ précédente (modèle de la ligne), pour 2 modèles différents, avec 2 et 10 cellules.

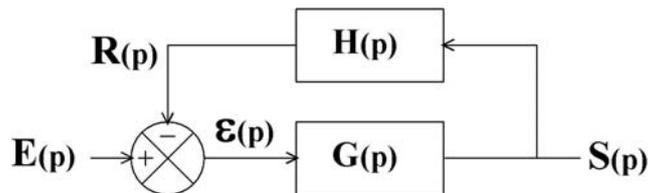
Déterminer les valeurs de R_0 , C_0 et L_0 pour ces deux modèles, comparer les résultats, et décrire quel pourrait être l'intérêt d'un tel modèle dans un enseignement.

Partie C : régulation simplifiée du courant de ligne

La puissance transmise sur le câble est le produit de la tension continue aux bornes du câble par le courant qui y circule. Cette puissance est conservée sur le réseau alternatif de la station 2 et correspond aux besoins énergétiques. Pour optimiser la distribution de l'énergie, on a intérêt à ce que le courant et la tension soient en phase. Il est donc nécessaire d'asservir le courant sur chacune des phases du réseau triphasé à une consigne liée à la puissance.

B.1 : C.I Étude d'une boucle de régulation

La boucle de régulation présente une fonction de transfert $H(p)$ dans la boucle de retour :

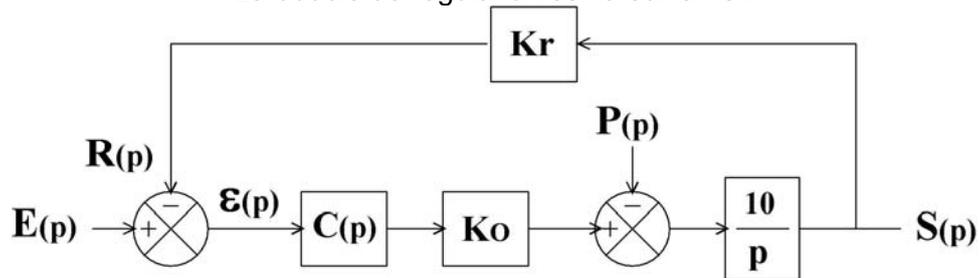


C.I.1 Donner l'expression de la fonction de transfert $T_{Bo}(p)$ en boucle ouverte, avec

$$T_{Bo}(p) = \frac{R(p)}{\varepsilon(p)}$$

C.I.2 Donner l'expression de la fonction de transfert $T(p)$ en boucle fermée.

La boucle de régulation est la suivante :



Les courants sont mesurés à partir de sondes à effet Hall de gain K_r . On considèrera les valeurs numériques suivantes :

$K_r = 0,01$ V/A Gain du capteur de courant

$K_o = 40\ 000$ Gain de l'onduleur

L'entrée $P(p)$ est une perturbation et l'entrée $E(p)$ une consigne.

C.1 : Correction proportionnelle : $C(p) = K_p$

D.1 : C.I.3 L'entrée de perturbation est constante, on applique un échelon d'entrée $E(p) = E_0 / p$, donner la valeur de l'erreur en régime permanent en la justifiant, mais sans aucun calcul.

E.1 : C.I.4 L'entrée de la boucle de régulation est constante, on applique un échelon de perturbation $P(p) = P_0 / p$, donner la valeur de l'erreur en régime permanent en la justifiant, mais sans aucun calcul.

F.1 : C.I.5 Donner l'expression littérale de l'erreur $\varepsilon(p)$ en fonction de K_p , K_r , K_o , $E(p)$ et $P(p)$

C.I.6 Retrouver, à l'aide du théorème de la valeur finale cette fois, les résultats des questions C.I.3 et C.I.4

On s'intéresse au comportement dynamique de l'asservissement. L'entrée de perturbation est constante : $P(p) = 0$.

C.I.7 Donner l'expression temporelle de la sortie $s(t)$ en réponse à un échelon d'entrée d'amplitude E_0 .

C.I.8 Donner l'expression du temps de réponse à 5%

C.I.9 Déterminer la valeur numérique de K_p (gain du correcteur proportionnel) pour obtenir un temps de réponse à 5% de 20 ms

G.1 : Correction proportionnelle et intégrale (PI) : $C(p) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i p} \right)$

C.I.10 Tracer sur le document réponse R5 le diagramme asymptotique de Bode de ce correcteur en précisant les valeurs particulières (on prendra pour le tracé $T_i = 1\text{ms}$ et $K_p = 0,1$).

On désire améliorer la stabilité de la boucle de régulation.

C.I.11 L'entrée de la boucle de régulation est constante, on applique un échelon de perturbation $P(p) = P_0 / p$, donner la valeur de l'erreur en régime permanent, justifier la réponse et justifier le rôle du correcteur PI.

Pour la suite de cette étude $P(p) = 0$ et on envisage une variation de la consigne $E(p)$.

C.I.12 Donner l'expression de la fonction de transfert $T_{BO}(p)$ en boucle ouverte en fonction de K_p , T_i , K_r , K_o .

C.I.13 Tracer le diagramme de Bode asymptotique du système en boucle ouverte sur le document réponse R6

C.I.14 On cherche à obtenir une marge de phase de 45° à la pulsation de 1000 rad/s . Calculer les constantes K_p et T_i (on demande de déterminer les valeurs par le calcul, et non graphiquement).

La fonction de transfert en boucle ouverte (sans correcteur inséré dans la boucle) est en pratique celle indiquée sur la feuille de réponse R7

C.I.15 On cherche encore à obtenir une marge de phase de 45° à la pulsation de $1\ 000\text{ rad/s}$. Calculer la constante K_p du correcteur PI pour $T_i = 1\text{ms}$.

H.1 : C.II Étude d'un asservissement numérique de courant

C.II.1 Soit la fonction de transfert $R(p)$ définie ci-dessous :

$$R(p) = e^{-\tau p}$$

Indiquer ce que représente cette fonction de transfert

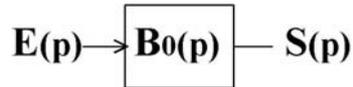
C.II.2 Compléter le document réponse R8 en donnant les valeurs numériques du module et de la phase exprimée en degré pour les pulsations indiquées.

La fonction de transfert $R(p)$ est approchée par la fonction de transfert suivante $R_0(p)$: $R_0(p) = \frac{1 - \frac{\tau p}{2}}{1 + \frac{\tau p}{2}}$

C.II.3 Compléter le document réponse R9 en donnant les valeurs numériques du module et de la phase de $R_0(p)$ pour les pulsations indiquées.

C.II.4 Tracer le diagramme de Bode de $R(p)$ et $R_0(p)$ sur le document réponse R10 en vous aidant des valeurs numériques indiquées dans les deux tableaux précédents, on prendra $\tau = 10\ \mu\text{s}$ et donner les limites fréquentielles de l'approximation (la limite fréquentielle sera estimée lorsque l'écart entre les phases est supérieur à 45°).

Soit $B_0(p)$ le bloqueur d'ordre 0.



C.II.5 Rappeler la réponse d'un bloqueur d'ordre 0 à une impulsion de Dirac en entrée. On note T_e la période d'échantillonnage

C.II.6 En déduire à partir de la transformée de Laplace, la fonction de transfert d'un bloqueur d'ordre 0.

$$\text{On rappelle que } S(p) = \int_0^{\infty} s(t)e^{-pt} dt$$

C.II.7 Compléter le document réponse R11 en indiquant la fonction réalisée par le bloqueur d'ordre 0 en représentant l'évolution temporelle de $s(t)$.

C.II.8 Donner l'expression de la fonction de transfert $B(p)$ du bloqueur d'ordre zéro.

$$\text{On supposera pour cela (approximation de Padé) que : } e^{-pT_e} = \frac{1 - \frac{pT_e}{2}}{1 + \frac{pT_e}{2}}$$

C.II.9 Conclure sur la validité de l'approximation au regard des contraintes imposées sur la fréquence d'échantillonnage T_e .

C.II.10 Indiquer l'effet que peut avoir le bloqueur d'ordre 0 sur les performances de la régulation.

On cherche maintenant à décrire l'algorithme du correcteur proportionnel intégral implanté numériquement. On rappelle la fonction de transfert du correcteur PI ci dessous :

$$C(p) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i p} \right)$$

C.II.11 Écrire l'équation différentielle reliant $e(t)$, $\frac{de(t)}{dt}$ et $\frac{ds(t)}{dt}$

Les échantillons d'un signal $x(t)$ pris aux instant kT_e , $(k-1)T_e$, ... sont notés $x(k)$, $x(k-1)$, De plus, on calculera la dérivée du signal $x(t)$ aux instants kT_e par la relation suivante (Euler) :

$$\frac{dx(k)}{dt} = \frac{x(k) - x(k-1)}{T_e}$$

C.II.12 Écrire l'équation récurrente permettant de calculer l'échantillon $s(k)$.

C.II.13 En déduire la fonction de transfert en z du correcteur PI.

Le correcteur de la boucle de courant est implanté numériquement.

C.II.14 Compléter le document réponse R12 en précisant le contenu des blocs.

C.II.15 L'échantillonneur bloqueur est généralement précédé d'un filtre passe-bas. Préciser l'intérêt de ce filtre.

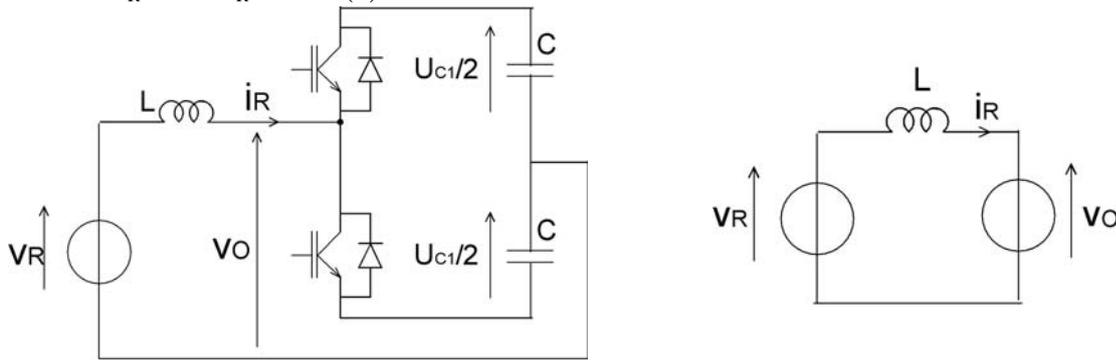
I.1 : C.III Modélisation de la boucle de régulation en courant

Dans l'hypothèse simplificatrice où l'on néglige tout déséquilibre, les puissances actives et réactives consommées par l'onduleur de la station 1 s'écrivent :

$$P = 3V_R I_R \cos(\varphi)$$

$$Q = 3V_R I_R \sin(\varphi)$$

Dans ces mêmes hypothèses, l'étude de la régulation peut porter sur le schéma équivalent par phase suivant, avec $v_R(t) = V_R \sqrt{2} \cos(\theta)$ et $\theta = \omega t$, ω étant la pulsation du réseau alternatif.



En supposant une fréquence de découpage élevée, on suppose toujours que la tension v_O est parfaitement sinusoïdale pour le circuit v_R , L , v_O , et qu'elle s'écrit :

$$v_O(t) = V_O \sqrt{2} \cos(\theta - \psi)$$

Le courant réseau est mesuré par l'intermédiaire d'un capteur de courant de gain K_i . L'onduleur de tension se comporte vis-à-vis de sa commande comme un gain pur G_O .

- C.III.1** On cherche à mesurer une éventuelle composante continue sur le courant réseau, donner la technologie des capteurs à ne pas employer.
- C.III.2** En utilisant les variables de Laplace, exprimer la relation entre $I_R(p)$, $V_R(p)$ et $V_O(p)$.
- C.III.3** Compléter le document réponse R13 en faisant notamment apparaître sur la feuille de réponse, la tension réseau $V_R(p)$, la tension onduleur $V_O(p)$, le gain de la sonde de courant K_i , et en remplissant le bloc vide par sa fonction de transfert.
- C.III.4** Donner l'expression numérique temporelle de la consigne en courant $i_{réf}(t)$ de sorte que le réseau triphasé fournisse une puissance de 50 MW, avec une puissance réactive nulle (on prendra $V_R = 46$ kV).
- C.III.5** Donner dans ces mêmes conditions l'expression de $v_O(t)$, en précisant sa valeur efficace et son déphasage par rapport à $v_R(t)$, on prendra $L = 100$ mH
- C.III.6** Préciser la principale différence entre l'étude qu'il faudrait porter au correcteur dans ce cas, et celle effectuée dans la partie C.I

La commande de l'onduleur nécessite en pratique d'estimer très précisément la pulsation du réseau et plus particulièrement sa phase.

- C.1II.7** Proposer un dispositif permettant de connaître et de suivre la phase des tensions réseau.

(1) Partie D : modèle de la station 1

Soit le système triphasé direct de tension suivant :

$$v_{OA}(t) = V_O \sqrt{2} \cos(\theta - \psi)$$

$$v_{OB}(t) = V_O \sqrt{2} \cos(\theta - 2\pi/3 - \psi)$$

$$v_{OC}(t) = V_O \sqrt{2} \cos(\theta + 2\pi/3 - \psi)$$

Ce réseau triphasé peut s'écrire sous forme matricielle de la façon suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{OA} \\ V_{OB} \\ V_{OC} \end{bmatrix} = V_o \sqrt{2} \sqrt{\frac{3}{2}} \times [T_{32}] \times [R(\theta - \psi)] \times \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$[T_{32}]$ est la matrice de Concordia et s'écrit : $[T_{32}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}$

$[R(\theta)]$ est la matrice de rotation et s'écrit : $[R(\theta)] = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$

D.1 Vérifier que la matrice $[T_{32}]$ est normée en démontrant la relation suivante :

$$[T_{32}^T] \times [T_{32}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

On peut également montrer que la matrice inverse de $[R(\theta)]$ s'écrit :

$$[R(\theta)]^{-1} = [R(-\theta)]$$

Un système triphasé sans composante homopolaire peut être remplacé par un système diphasé de même pulsation (conservation des puissances actives et réactives). Ce passage est symbolisé par la transformation T_{32} . Une rotation de pulsation ω (pulsation réseau) appliquée au système diphasé permet de s'affranchir du temps. Par conséquent, après cette deuxième transformation les grandeurs V_d et V_q obtenues sont des tensions continues. La transformation peut être appliquée aux courants également et la puissance est conservée.

Un système triphasé sans composante homopolaire (système direct et inverse) peut alors se mettre sous la forme générale suivante :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = [T_{32}] \times [R(\omega t + \varphi)] \times \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix}$$

V_d et V_q sont des grandeurs continues lorsque $\theta = \omega t$, avec ω la pulsation du réseau.

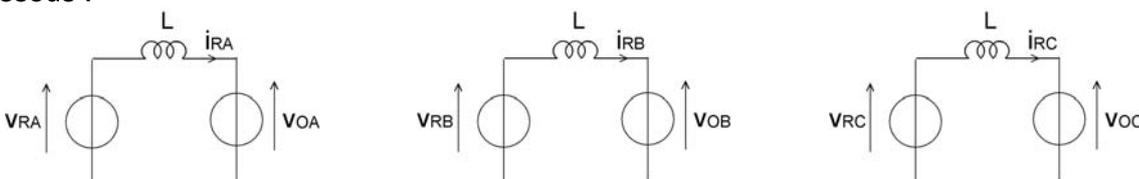
D.2 Montrer la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = [R(-\omega t - \varphi)] \times [T_{32}^T] \times \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix}$$

D.3 En appliquant cette relation au système triphasé direct présenté en début de cette partie ($v_{OA}(t)$, $v_{OB}(t)$, $v_{OC}(t)$), en remarquant que $\theta = \omega t$ et pour $\varphi = 0$, exprimer V_{Od} et V_{Oq} .

D.4 À partir du résultat précédent, écrire les grandeurs continues, respectivement, V_{Rd} , V_{Rq} et I_{Rd} , I_{Rq} des grandeurs triphasées v_{RA} , v_{RB} , v_{RC} et i_{RA} , i_{RB} , i_{RC} .

D.5 On reprend maintenant la modélisation du courant réseau, mais de façon triphasée cette fois ; en décomposant le système triphasé en trois réseaux monophasés indépendants tels que présentés ci-dessous :



Écrire les trois équations instantanées indépendantes permettant de relier la dérivée temporelle des courants de ligne I_{RA} , I_{RB} , I_{RC} aux tensions V_{RA} , V_{RB} , V_{RC} et V_{OA} , V_{OB} , V_{OC} .

D.6 Montrer, qu'après application des matrices de Concordia et de rotation, ces trois équations peuvent s'écrire sous la forme matricielle suivante :

$$[\mathbf{R}(\theta)] \times \begin{bmatrix} V_{Rd} \\ V_{Rq} \end{bmatrix} - [\mathbf{R}(\theta)] \times \begin{bmatrix} V_{Od} \\ V_{Oq} \end{bmatrix} = L \times \frac{d}{dt} \left([\mathbf{R}(\theta)] \times \begin{bmatrix} I_{Rd} \\ I_{Rq} \end{bmatrix} \right)$$

D.7 En utilisant la relation matricielle suivante :

$$\frac{d}{dt} \left([\mathbf{R}(\theta)] \times \begin{bmatrix} I_{Rd} \\ I_{Rq} \end{bmatrix} \right) = \frac{d}{dt} [\mathbf{R}(\theta)] \times \begin{bmatrix} I_{Rd} \\ I_{Rq} \end{bmatrix} + [\mathbf{R}(\theta)] \times \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{Rd} \\ I_{Rq} \end{bmatrix}$$

$$\text{et en constatant que : } \frac{d}{dt} [\mathbf{R}(\theta)] = \omega [\mathbf{R}(\theta + \frac{\pi}{2})]$$

Montrer que les grandeurs continues associées aux grandeurs triphasées des tensions et courants respectent la relation matricielle suivante :

$$[V_{RP}] - [V_{OP}] = L\omega \times [\mathbf{R}(-\theta)] \times [\mathbf{R}(\theta + \frac{\pi}{2})] \begin{bmatrix} I_{Rd} \\ I_{Rq} \end{bmatrix} + L \times \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{Rd} \\ I_{Rq} \end{bmatrix}$$

D.8 Montrer alors que les grandeurs continues des tensions et courants peuvent s'écrire de la manière suivante :

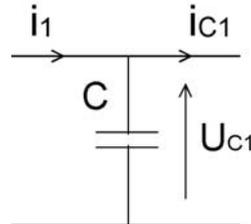
$$V_{Rd} - V_{Od} = L \frac{d(I_{Rd})}{dt} - L\omega I_{Rq}$$

$$V_{Rq} - V_{Oq} = L \frac{d(I_{Rq})}{dt} + L\omega I_{Rd}$$

que l'on peut écrire également sous la forme suivante :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{Rd} \\ I_{Rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega \\ -\omega & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_{Rd} \\ I_{Rq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} V_{Rd} - V_{Od} \\ V_{Rq} - V_{Oq} \end{bmatrix}$$

On cherche maintenant un modèle pour le contrôle de la tension U_{C1} de sortie du convertisseur. On note i_1 , le courant de sortie du convertisseur et i_{C1} le courant dans le câble.



D'autre part, on considère les grandeurs de commande du convertisseur, notées m_d et m_q , telles que :

$$v_{Od} = m_d \frac{u_{C1}}{2}$$

$$v_{Oq} = m_q \frac{u_{C1}}{2}$$

On utilisera également la propriété de conservation de la puissance des transformations utilisées, propriété se traduisant par l'équation suivante :

$$u_{C1} \times i_1 = v_{Od} \times i_{Rd} + v_{Oq} \times i_{Rq}$$

D.9 En utilisant la conservation de la puissance instantanée entre entrée et sortie du convertisseur, écrire la relation reliant i_1 à i_{rd} , i_{rq} , m_d et m_q .

D.10 En appliquant la loi des nœuds à la figure précédente, montrer que l'évolution de la tension aux bornes de C peut se mettre sous la forme suivante :

$$\beta \frac{d(u_{C1})}{dt} = i_{Rd} + i_E$$

D.11 Donner les expressions de β et i_E .

On note : $i = i_{Rd} + i_E$

D.12 Le document réponse R14 représente le schéma bloc de la boucle de régulation intégrant également le modèle du système. Compléter le document réponse R14 en rajoutant dans la modélisation du système, l'entrée sur l'additionneur et la fonction de transfert du bloc vide.

(2) Partie E : modèle d'état de la boucle de courant et régulation du courant de ligne au sens des variables d'état

Un système modélisé sous la forme d'une représentation d'état peut s'écrire de la façon suivante :

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= [A] \times [x(t)] + [B] \times [e(t)] \\ s(t) &= [C] \times [x(t)] + [D] \times [e(t)] \end{aligned}$$

Dans la première équation, la matrice d'état $[A]$ garantit la stabilité du système. La matrice $[C]$ de la seconde équation est la matrice d'observation (mesure).

$[x(t)]$ est le vecteur d'état
 $\dot{x}(t) = \left[\frac{dx(t)}{dt} \right]$ est la dérivée du vecteur d'état
 $[e(t)]$ est le vecteur de commande
 $[s(t)]$ est le vecteur de sortie
 $[B]$ est la matrice de commande

La modélisation de l'évolution des courants I_{Rd} et I_{Rq} , écrite à la question D.8 est rappelée et simplifiée ici dans le cas où la tension réseau est prise comme origine des phases ($V_{Rq} = 0$).

$$\begin{aligned} V_{Rd} - V_{Od} &= L \frac{d(I_{Rd})}{dt} - L\omega I_{Rq} \\ -V_{Oq} &= L \frac{d(I_{Rq})}{dt} + L\omega I_{Rd} \end{aligned}$$

Le vecteur d'état $[x(t)]$ s'écrit : $[x(t)] = \begin{bmatrix} I_{Rd} \\ I_{Rq} \end{bmatrix}$

Les grandeurs de commande de l'onduleur triphasées notées m_d et m_q contrôlent respectivement les composantes V_{Od} et V_{Oq} du réseau triphasé de tensions à l'entrée du convertisseur, V_{OA} , V_{OB} , V_{OC} . Il vient :

$$\begin{aligned} V_{Od} &= m_d \frac{U_{c1}}{2} \\ V_{Oq} &= m_q \frac{U_{c1}}{2} \end{aligned}$$

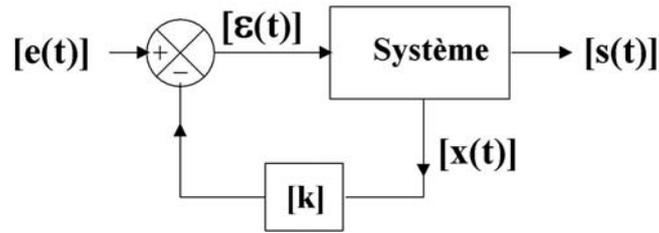
Le vecteur de commande $[e(t)]$ sera le vecteur suivant : $[e(t)] = \begin{bmatrix} m_d - \frac{2V_{Rd}}{U_{c1}} \\ m_q \end{bmatrix}$

On ne s'intéresse dans cette partie qu'à la stabilité de la boucle de courant et seule la première équation sera considérée par la suite.

$$\dot{x}(t) = [A] \times [x(t)] + [B] \times [e(t)]$$

E.1 À partir des vecteurs d'état et de commande, donner les expressions des composantes des matrices $[A]$ et $[B]$, qui sont toutes deux des matrices 2×2 .

Le système est ensuite bouclé par une matrice de gain $[k]$ 2×2 , les vecteurs d'état et de commande étant de rang 2.



E.2 À partir de l'expression temporelle $\dot{x}(t) = [A] \times [x(t)] + [B] \times [\varepsilon(t)]$, montrer que la transformée de Laplace $[X(p)]$ de $[x(t)]$ peut s'écrire :

$$[X(p)] = (p \times [I] - [A])^{-1} \times [B] \times \varepsilon(p)$$

avec p la variable de Laplace et $[I]$ la matrice identité, $[I] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$

Soit $P^*(p)$ le polynôme caractéristique défini par :

$$P^*(p) = \det\{p \times [I] - [A] + [B] \times [k]\}$$

Les pôles de la fonction de transfert en boucle fermée sont les racines de l'équation caractéristique précédente, valeurs de p (variable de Laplace) pour lesquelles le polynôme caractéristique est nul.

On prendra une matrice de gain $[k]$ de la forme suivante : $[k] = \begin{bmatrix} k_1 & k_2 \\ -k_2 & k_1 \end{bmatrix}$

E.3 Écrire le polynôme caractéristique $P^*(p)$ sous la forme suivante :

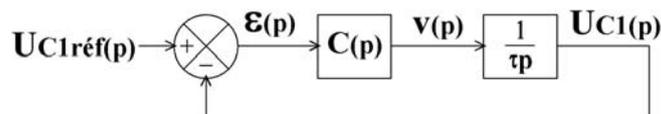
$$P^*(p) = p^2 + \alpha_1 p + \alpha_2$$

E.4 Donner les expressions de α_1 et α_2 .

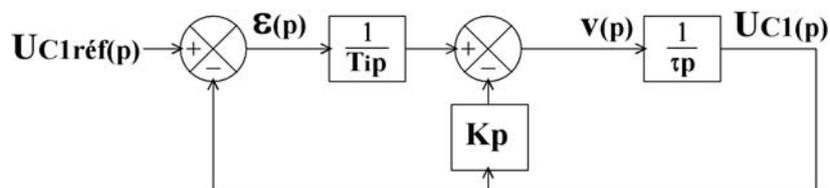
E.5 Conclure sur l'intérêt d'une commande par retour d'état.

(3) Partie F : régulation de la tension de sortie de la station 1

La boucle de tension fait apparaître le schéma fonctionnel suivant :



Le correcteur retenu est de type proportionnel intégral sans zéro dont l'architecture est présentée ci-dessous :



F.1 Donner l'expression des coefficients T_i et K_p du correcteur permettant d'obtenir en boucle fermée une réponse du second ordre du type :

$$\frac{U_{c1}(p)}{U_{c1réf}(p)} = \frac{1}{1 + \frac{2mp}{\omega_0} + \frac{p^2}{\omega_0^2}}$$

On choisit les constantes T_i et K_p afin d'obtenir $m = 1/\sqrt{2}$ et une bande passante à -3 dB valant 10 Hz.

F.2 Donner l'expression de m et ω_0 en fonction de T_i , K_p et τ .

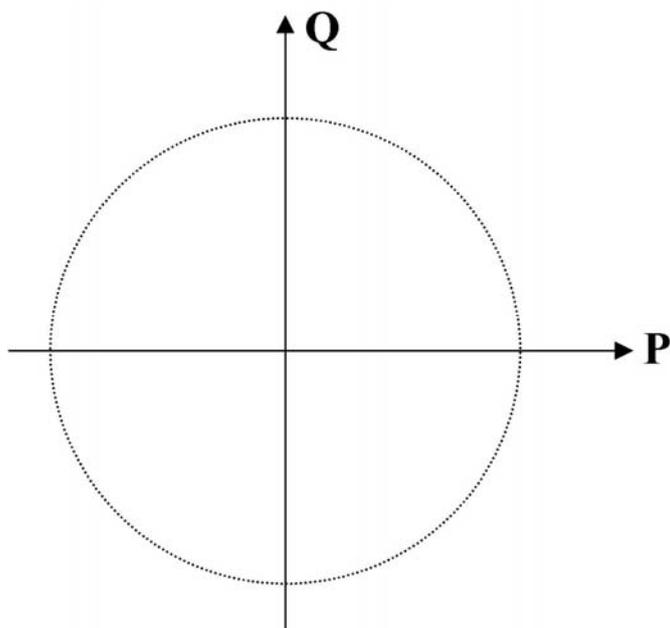
F.3 Tracer l'allure de la réponse à un échelon de consigne sur le document réponse R15, on ne demande pas d'indications numériques, simplement une allure.

F.4 Calculer la pulsation ω_0 .

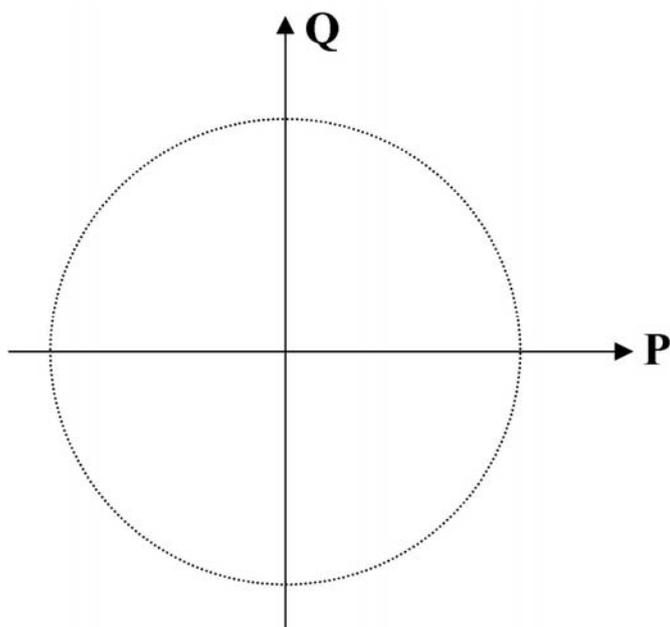
F.5 Donner le temps de réponse à 5% de la boucle de tension.

2.

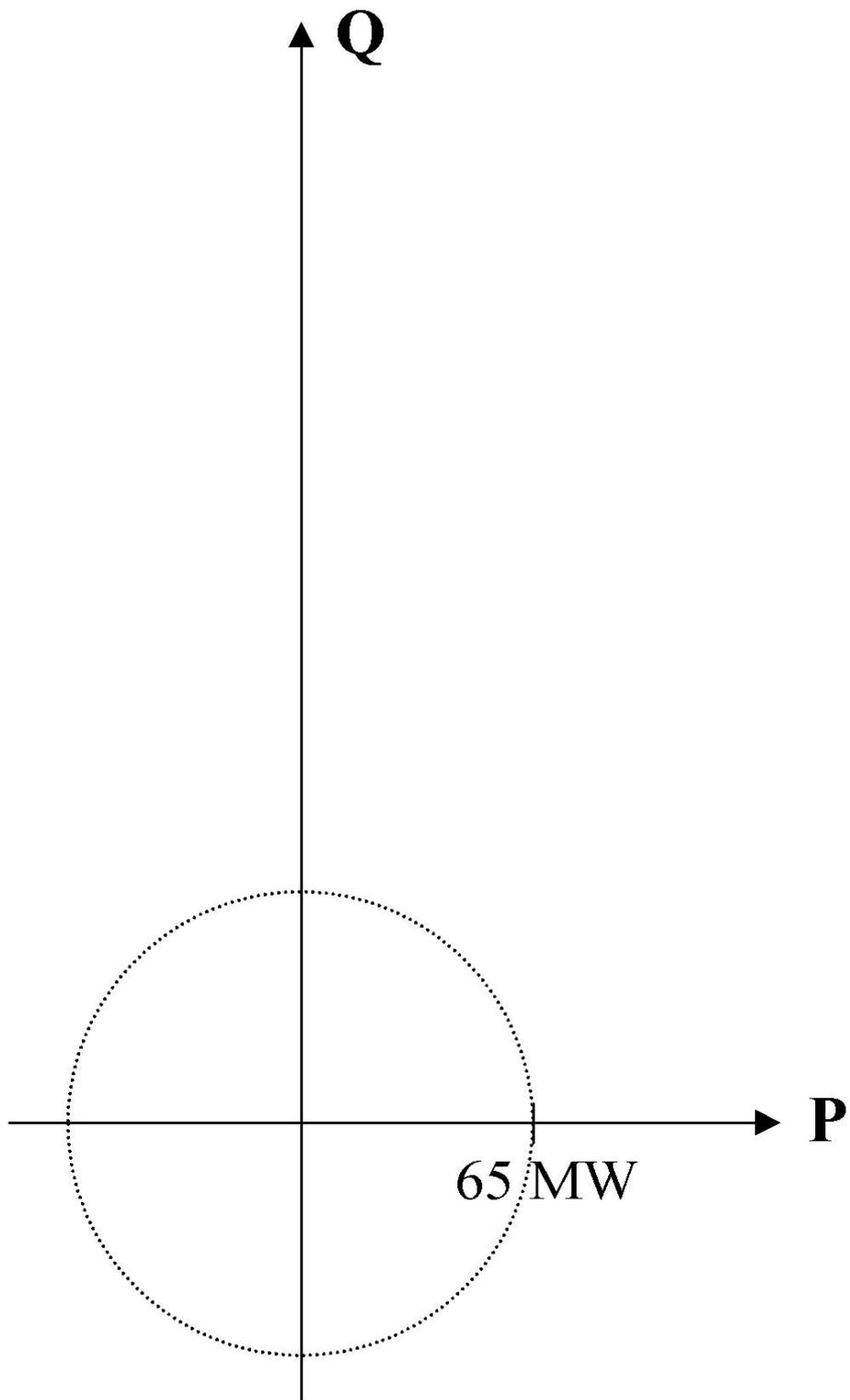
3. Document Réponse R1



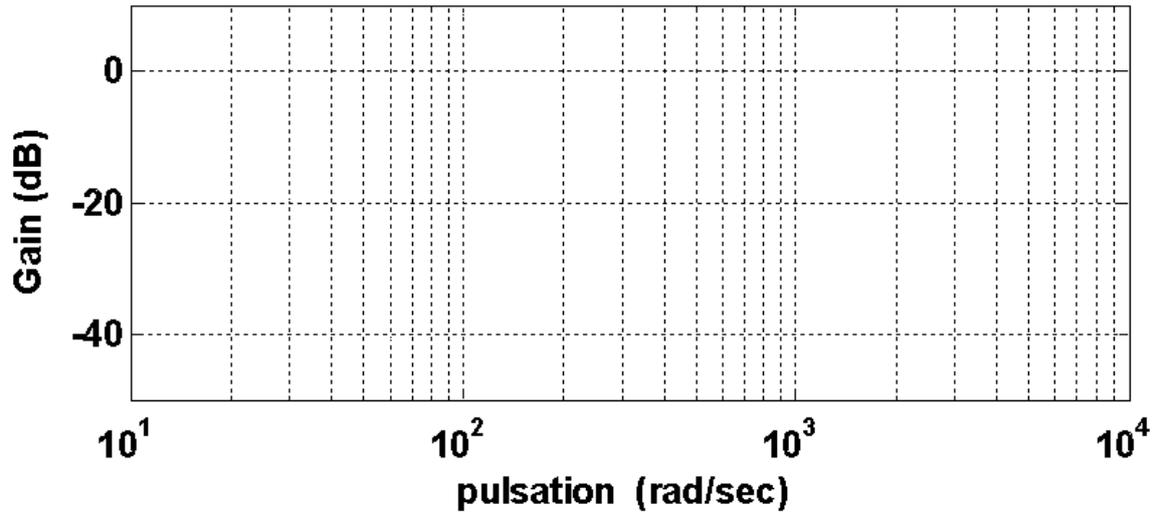
4. Document Réponse R2



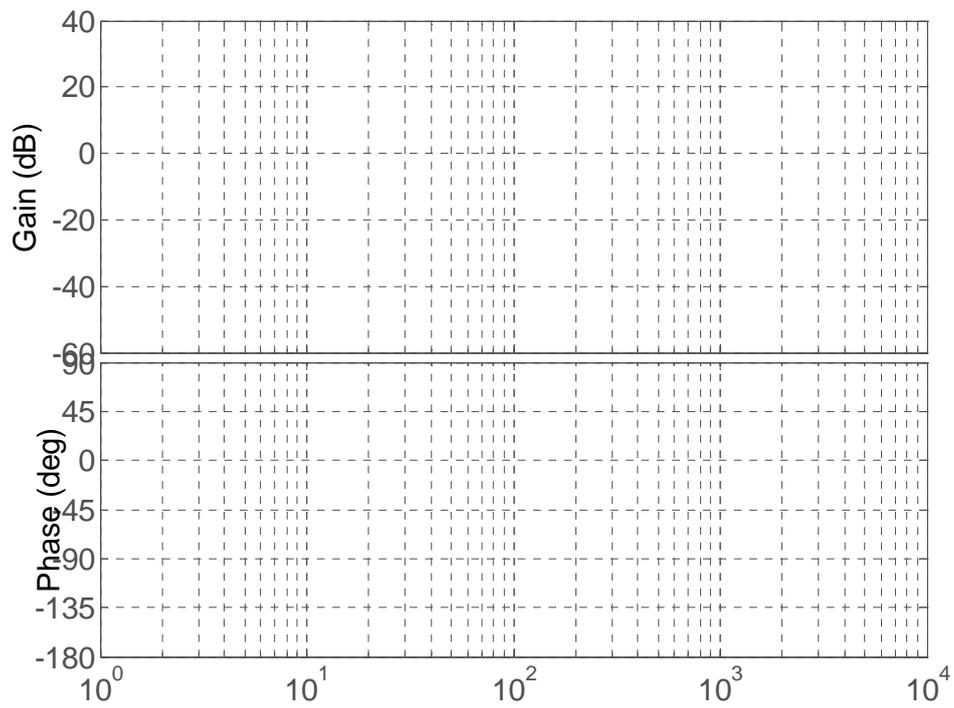
5. Document Réponse R3



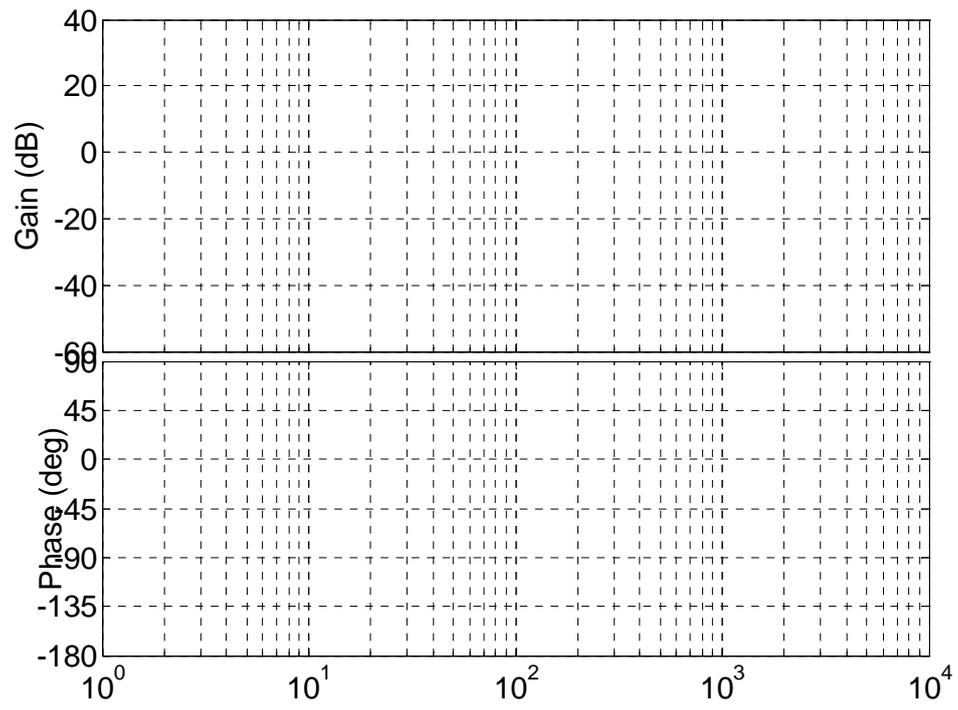
6. Document Réponse R4



7. Document Réponse R5

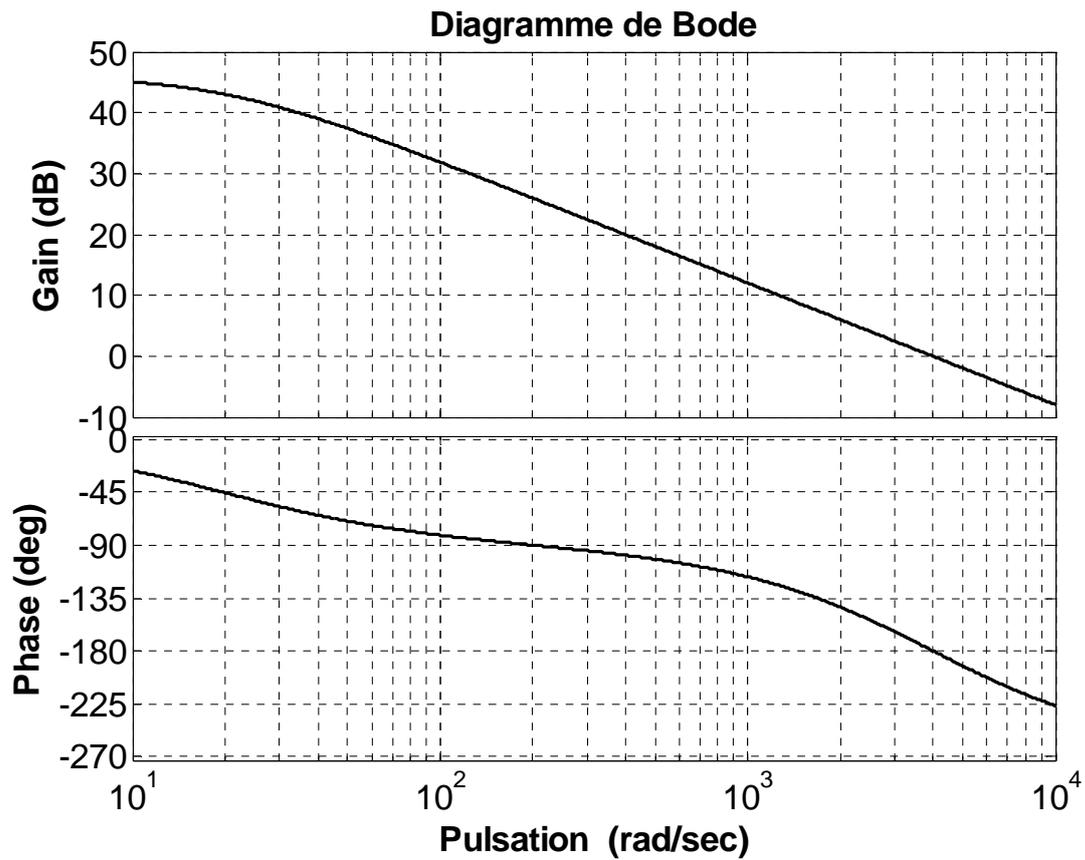


8. Document Réponse R6



- 9.
- 10.
- 11.

12. Document Réponse R7



13.

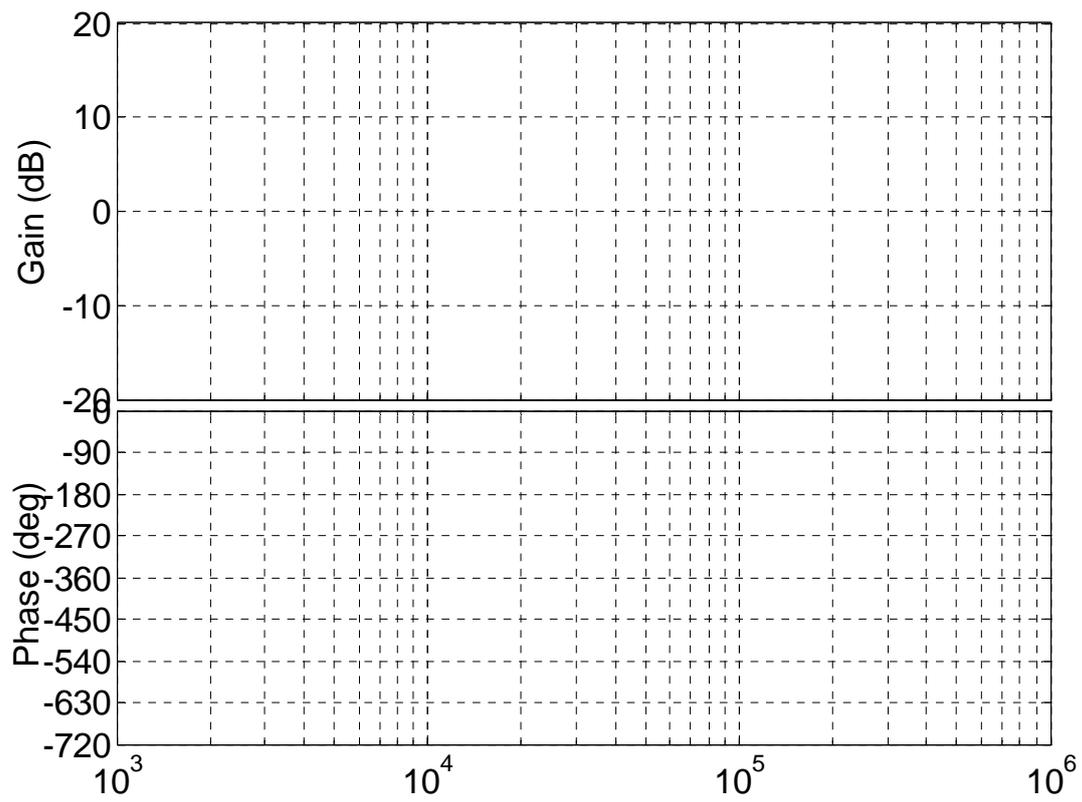
14. Document Réponse R8

ω	$1/(100\tau)$	$1/(10\tau)$	$1/(\tau)$	$10/(\tau)$
$ \underline{R}(j\omega) $				
$\text{Arg}(\underline{R}(j\omega))$				

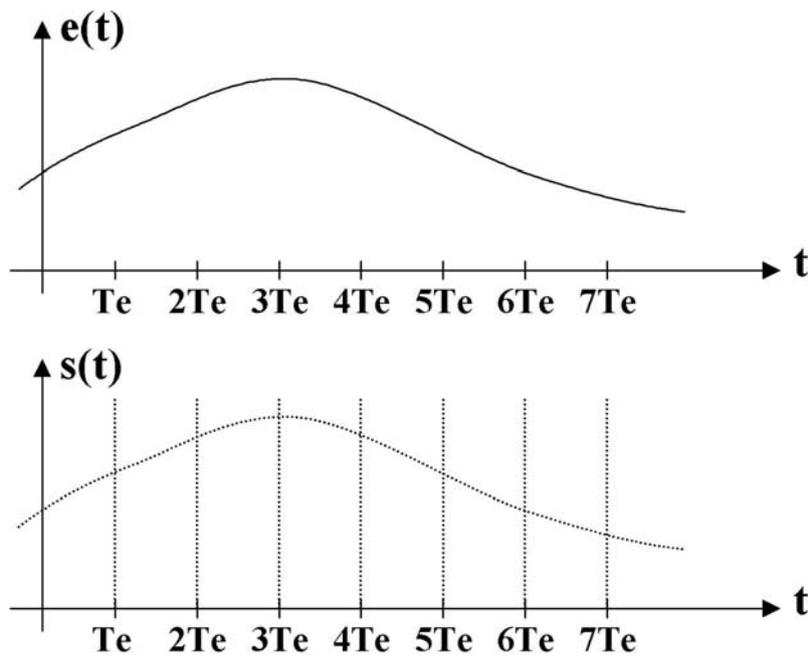
15. Document Réponse R9

ω	$1/(100\tau)$	$1/(10\tau)$	$1/(\tau)$	$10/(\tau)$
$ \underline{R}_0(j\omega) $				
$\text{Arg}(\underline{R}_0(j\omega))$				

16. Document Réponse R10

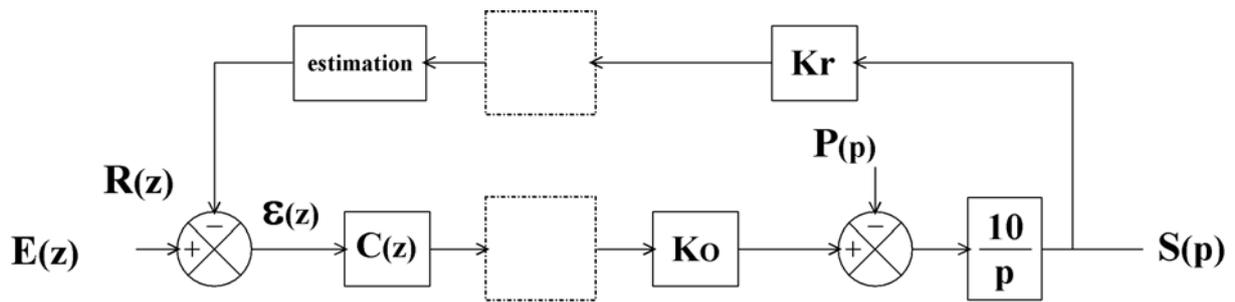


17. Document Réponse R11

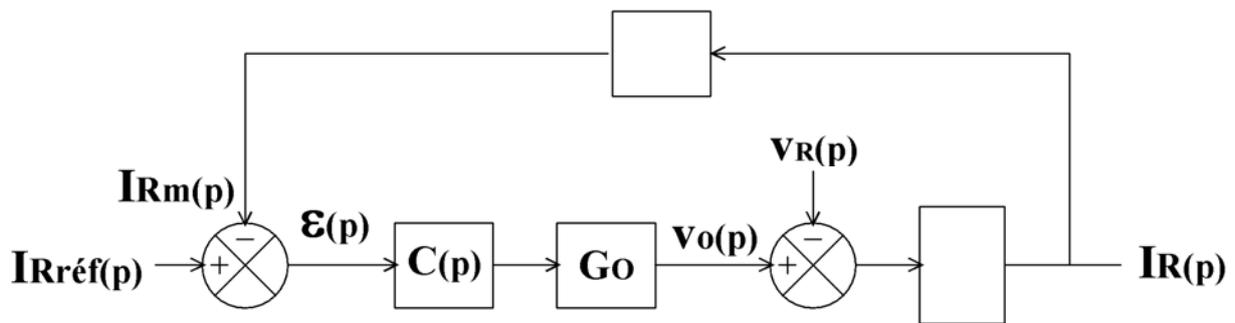


18. Document Réponse R12

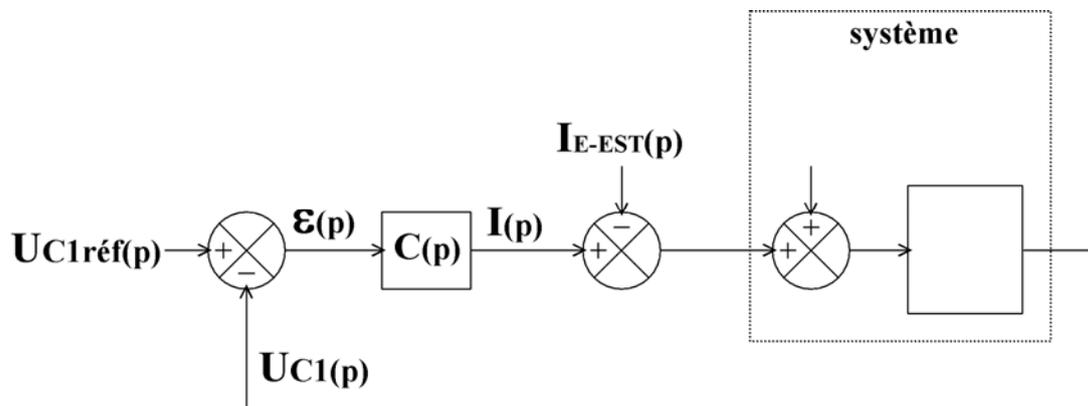
19.
20.



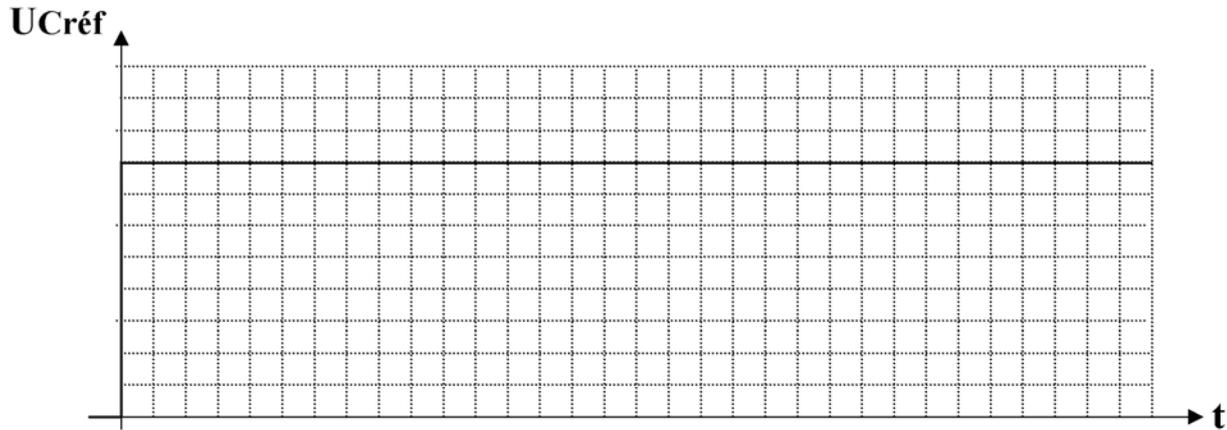
21. Document Réponse R13



22. Document Réponse R14



23. Document Réponse R15



Partie A : contrôle de l'énergie

A.1 La station 1 assure le contrôle de la puissance réactive Q_1 et de la tension du bus continu U_{C1} . La station 2, identique en tous points à la station 1 contrôle également la puissance réactive Q_2 absorbée ou fourni au réseau 2. Quelle autre grandeur est nécessairement contrôlée par la station 2 ?

La puissance active P transitant entre les deux stations (ou le courant continu)

A.2 Donner l'expression temporelle des grandeurs de commande m_A , m_B et m_C en fonction de V_o , ψ , et U_{C1} .

$$v_{oA}(t) = m_A(t) \frac{U_{C1}}{2} = V_o \sqrt{2} \cos(\theta - \psi) \qquad m_A(t) = \frac{2V_o \sqrt{2}}{U_{C1}} \cos(\theta - \psi)$$

$$v_{oB}(t) = m_B(t) \frac{U_{C1}}{2} = V_o \sqrt{2} \cos(\theta - 2\pi/3 - \psi) \qquad \text{d'où, } m_B(t) = \frac{2V_o \sqrt{2}}{U_{C1}} \cos(\theta - 2\pi/3 - \psi)$$

$$v_{oC}(t) = m_C(t) \frac{U_{C1}}{2} = V_o \sqrt{2} \cos(\theta + 2\pi/3 - \psi) \qquad m_C(t) = \frac{2V_o \sqrt{2}}{U_{C1}} \cos(\theta + 2\pi/3 - \psi)$$

A.3 Quelle est la différence de potentiel entre les deux câbles de la liaison de transport à courant continu ?

160 kV

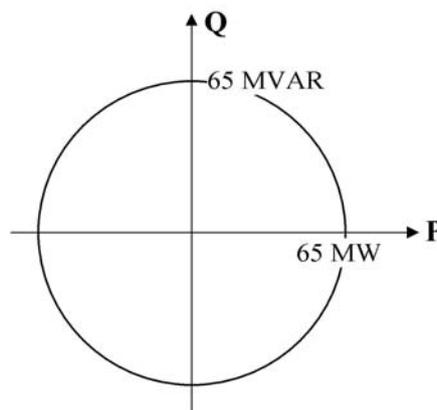
A.4 On note I_{RMAX} , le courant efficace réseau maximum limité par la capacité en courant des transistors de l'onduleur ; montrer que pour cette intensité maximale, le point de fonctionnement dans le plan P-Q est un cercle lorsque la tension réseau V_R est constante.

$$P = 3V_R I_R \cos(\varphi) \qquad \text{d'où pour } I_R = I_{RMAX}, \qquad \frac{P^2}{(3V_R I_{RMAX})^2} + \frac{Q^2}{(3V_R I_{RMAX})^2} = 1$$

$$Q = 3V_R I_R \sin(\varphi)$$

et l'équation du cercle : $P^2 + Q^2 = (3V_R I_{RMAX})^2$

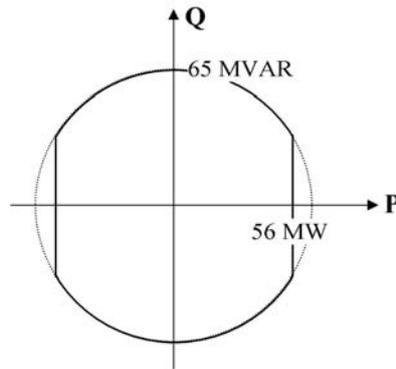
A.5 On donne $V_R = 46 \text{ kV}$ et $I_{RMAX} = 470 \text{ A}$. Préciser sur le document réponse R1 les valeurs numériques de P_{MAX} et Q_{MAX} .



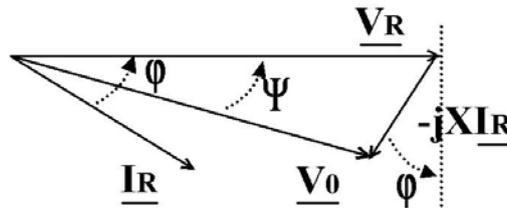
A.6 Le courant continu maximal dans le câble I_{DCMAX} est de 350 A. Calculer la puissance maximale pouvant transiter dans le câble.

$I_{DCMAX} = 350 \text{ A}$, $U_{DC} = 160 \text{ kV}$, d'où $P_{MAX} = 56 \text{ MW}$

A.7 Compléter alors dans ce cas la feuille de réponse R2 en indiquant les limites de fonctionnement dans le plan P-Q.



A.8 Tracer le diagramme de Fresnel des tensions \underline{V}_R , \underline{V}_O et du courant \underline{I}_R .



A.9 À l'aide du diagramme de Fresnel, montrer que l'expression de la puissance réactive peut se mettre sous la forme suivante :

$$Q = 3 \frac{V_R^2}{X} \left(1 - \frac{V_O}{V_R} \cos(\Psi) \right)$$

A l'aide des deux relations suivantes : $Q = 3V_R I_R \sin(\varphi)$ $V_R = V_O \cos(\Psi) + XI_R \sin(\varphi)$

A.10 Montrer que l'expression de la puissance active peut se mettre sous la forme suivante :

$$P = 3 \frac{V_O V_R}{X} \sin(\Psi)$$

A l'aide des deux relations suivantes : $P = 3V_R I_R \cos(\varphi)$ $V_O \sin(\Psi) = XI_R \cos(\varphi)$

A.11 La tension V_O est limitée à la valeur $V_{O\text{MAX}}$ liée à la tension du bus continu. Montrer à partir des deux relations précédentes que dans ces conditions, les limites du point de fonctionnement dans le plan P-Q sont situées sur un cercle. Vous préciserez dans le plan P-Q l'expression des coordonnées du cercle ainsi que son rayon.

On rappelle que dans le plan x-y, l'équation d'un cercle de centre (x_0, y_0) et de rayon R est la suivante :

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = R^2$$

A l'aide des deux questions précédentes : $\cos(\Psi) = \frac{V_R}{V_O} \left(1 - \frac{QX}{3V_R^2} \right)$ et $\sin(\Psi) = \frac{PX}{3V_R V_O}$

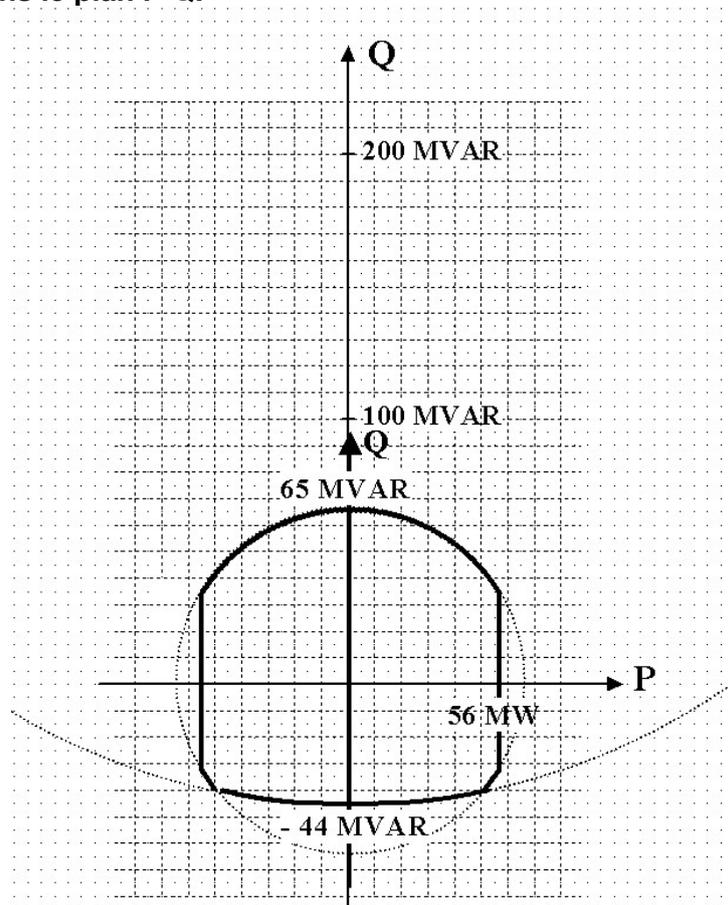
En écrivant : $\cos^2 \Psi + \sin^2 \Psi = 1$ il vient : $P^2 + \left(\frac{3V_R^2}{X} - Q \right)^2 = \left(\frac{3V_R V_O}{X} \right)^2$

Equation du cercle de centre $P_0 = 0$, $Q_0 = \frac{3V_R^2}{X}$ et de Rayon = $\frac{3V_R V_{OMAX}}{X}$

A.12 Faire les applications numériques correspondantes, on prendra $L = 100$ mH, et $V_{OMAX} = 56$ kV.

$Q_0 = 202$ MVA, Rayon = 246 MVA

A.13 Compléter alors la feuille de réponse R3 en indiquant toutes les limites du lieu des points de fonctionnement dans le plan P-Q.



A.14 Indiquer les valeurs numériques des limites en puissance active et réactive.

$$\begin{aligned} -56 \text{ MW} < P < 56 \text{ MW} \\ -44 \text{ MVAR} < Q < 65 \text{ MVAR} \end{aligned}$$

A.15 Quel est l'intérêt de contrôler la tension du câble au voisinage de sa limite en tension ?
Maximum de puissance transmise

A.16 Quelle est la grandeur de consigne qui sera déduite des consignes en puissance active et réactive ?
Le courant réseau

Partie B : modélisation du câble

B.1 Donner l'expression des éléments r, l et c du tronçon de câble de longueur dy.

$$r = R_y dy, l = L_y dy, c = C_y dy$$

B.2 Montrer que les courants et tensions le long de la ligne sont régis par les équations différentielles suivantes (équation des télégraphistes) :

En écrivant les lois des nœuds et lois des mailles, et en utilisant :

$$\frac{\partial v(y, t)}{\partial y} = \frac{v(y, t) - v(y - dy, t)}{dy}$$

on obtient en faisant les approximations nécessaires :

$$\frac{\partial^2 v(y, t)}{\partial y^2} = R_y C_y \frac{\partial v(y, t)}{\partial t} + L_y C_y \frac{\partial^2 v(y, t)}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 i(y, t)}{\partial y^2} = R_y C_y \frac{\partial i(y, t)}{\partial t} + L_y C_y \frac{\partial^2 i(y, t)}{\partial t^2}$$

B.3 On note Z(p) la charge de la ligne, montrer que la fonction de transfert de la ligne de transmission s'écrit :

avec $\gamma(p) = \frac{Z(p)}{Z_c(p)}$ et en utilisant : $\cosh^2(x) - \sinh^2(x) = 1$, on obtient :

$$H(p) = \frac{V_2(p)}{V_1(p)} = \frac{\gamma(p)}{\gamma(p) \times \cosh(\lambda(p) \times Y) + \sinh(\lambda(p) \times Y)}$$

$$V_2(p) = V_1(p) \times \cosh(\lambda(p) \times Y) - Z_c(p) \times I_1(p) \times \sinh(\lambda(p) \times Y)$$

$$I_2(p) = I_1(p) \times \cosh(\lambda(p) \times Y) - \frac{V_1(p)}{Z_c(p)} \times \sinh(\lambda(p) \times Y) \quad \text{et} \quad V_2(p) = Z(p) I_2(p)$$

$$\text{il vient alors :} \quad H(p) = \frac{V_2(p)}{V_1(p)} = \frac{Z(p)/Z_c(p)}{Z(p)/Z_c(p) \times \cosh(\lambda(p) \times Y) + \sinh(\lambda(p) \times Y)}$$

B.4 La charge de la ligne est modélisée par une résistance R_L. Déterminer la valeur à donner à cette résistance lorsque la puissance de 50 MW s'écoule sur la ligne.

$$R = U^2/P = 512 \, \Omega \quad (U = 160 \, \text{kV})$$

B.5 Le diagramme de Bode de la ligne de transmission est présenté en Annexe 1 dans le cas d'une charge résistive connectée à l'extrémité de la ligne, commenter ce diagramme et donner la valeur de l'amplification maximale (rapport V₂/V₁ max.).

Risque d'amplification à la fréquence de découpage et de surtension,

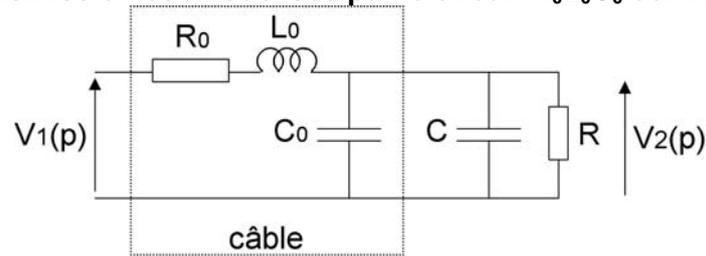
$$G_{\text{MAX}} = 16 \, \text{db d'où } V_2/V_1 \text{ max.} = 6,3$$

B.6 En pratique, une capacité est placée aux deux extrémités de la ligne. Le diagramme de Bode de la ligne de transmission est indiqué en Annexe 2 dans le cas d'une charge RC connectée à l'extrémité de la ligne, commenter à nouveau ce diagramme en indiquant l'effet de la capacité, et préciser à nouveau la valeur de l'amplification maximale.

Effet du condensateur : Filtre passe bas

Amplification : 11 dB

B.7 La ligne de transmission est modélisée par le circuit $R_0L_0C_0$ comme indiqué ci-dessous :



Calculer la fonction de transfert $V_2(p)/V_1(p)$ et la mettre sous la forme suivante :

$$\frac{V_2(p)}{V_1(p)} = \frac{K}{1 + \frac{2m}{\omega_0}p + \frac{p^2}{\omega_0^2}}$$

$$\frac{V_2(p)}{V_1(p)} = \frac{R/(R_0 + R)}{1 + \left(\frac{L_0 + R_0R(C_0 + C)}{R_0 + R}\right)p + \frac{RL_0(C_0 + C)}{R_0 + R}p^2}$$

B.8 En considérant les deux câbles de transport de longueur égale à 70 km chacun, soit 140 km au total, déterminer les valeurs de R_0 , L_0 et C_0 .

$$R_0 = 5,6 \Omega, L_0 = 28\text{mH}, C_0 = 42\mu\text{F}$$

B.9 Donner les expressions du gain K , du facteur d'amortissement m et de la pulsation ω_0 , puis faire les applications numériques. On prendra $C = 50 \mu\text{F}$ et $R = 512 \Omega$.

$$K = \frac{R}{R_0 + R} = 0,99 \quad (-0,1\text{dB}) \quad \frac{1}{\omega_0^2} = \frac{RL_0(C_0 + C)}{R_0 + R} \quad \text{d'où} \quad \omega_0 = 626 \text{ rd/s}$$

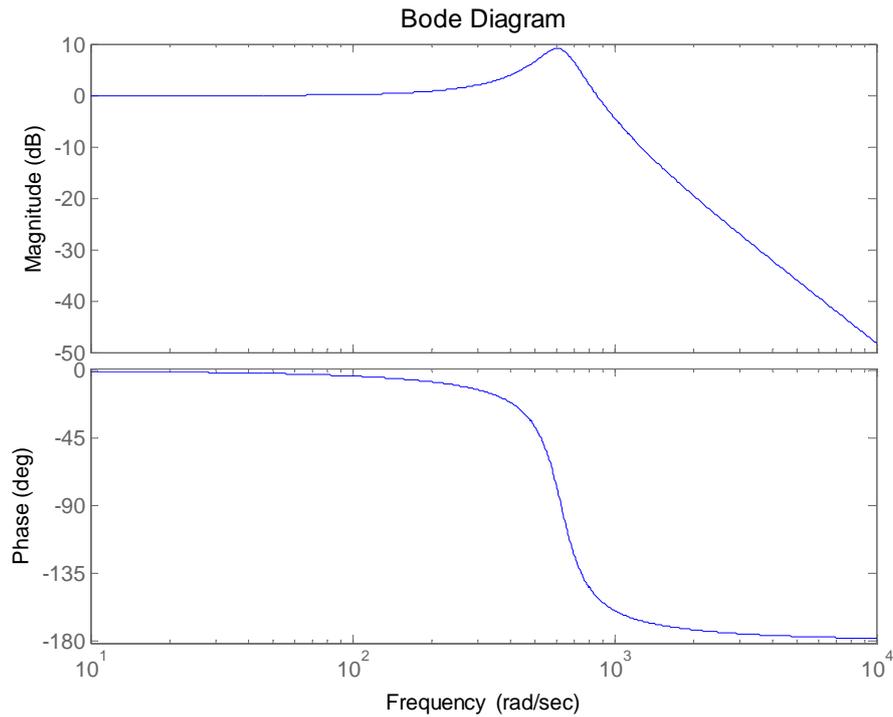
$$\frac{2m}{\omega_0} = \frac{L_0 + RR_0(C_0 + C)}{R_0 + R} \quad \text{d'où} \quad m = 0,176$$

B.10 Tracer sur la feuille de réponse R4 l'allure du gain (en dB), en précisant sur la feuille de réponse les quatre valeurs numériques suivantes : le gain à pulsation nulle, le gain maximal et la pulsation correspondante ainsi que la pente exprimée en dB par décade lorsque $\omega \gg \omega_0$.

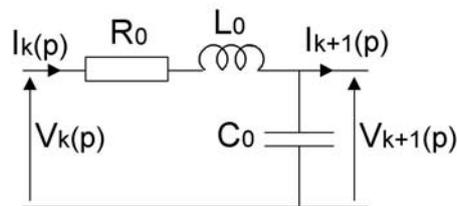
$$G(\omega=0) = -0,1 \text{ dB} \quad Q = \frac{1}{2m\sqrt{1-m^2}} = 2,9$$

$$G_{MAX} = 20\text{Log}Q + 20\text{Log}K = 9,2 - 0,1 = 9,1\text{dB} \quad \text{à} \quad \omega = \omega_R = \omega_0\sqrt{1-2m^2} = 606 \text{ rd/s} \quad \text{avec} \quad \omega_0 = 628 \text{ rd/s}$$

Pour $\omega \gg \omega_0$ pente : -40 dB/dec



B.11 On cherche maintenant à modéliser la ligne de transmission par un nombre fini de cellules RLC. Chaque cellule RLC représente une longueur L/N du câble, L étant la longueur totale du câble et N le nombre de cellules élémentaires. On notera R_0 , L_0 et C_0 les éléments de ces cellules élémentaires.



Écrire les éléments $A_{11}(p)$, $A_{12}(p)$, $A_{21}(p)$ et $A_{22}(p)$ de la matrice de transfert notée $[A]$ du quadripôle ainsi constitué telle que :

$$\begin{bmatrix} V_{k+1}(p) \\ I_{k+1}(p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11}(p) & A_{12}(p) \\ A_{21}(p) & A_{22}(p) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_k(p) \\ I_k(p) \end{bmatrix} \quad \text{avec } [A] = \begin{bmatrix} A_{11}(p) & A_{12}(p) \\ A_{21}(p) & A_{22}(p) \end{bmatrix}$$

$$V_k(p) = V_{k+1}(p) + (R_0 + L_0 p) I_k(p)$$

$$C_0 p V_{k+1}(p) = I_k(p) - I_{k+1}(p)$$

il vient :

$$V_{k+1}(p) = V_k(p) - (R_0 + L_0 p) I_k(p)$$

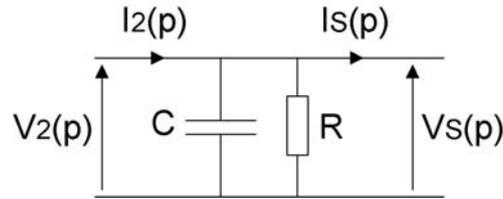
$$I_{k+1}(p) = -C_0 p V_k(p) + (1 + R_0 C_0 p + L_0 C_0 p^2) I_k(p)$$

d'où :

$$A_{11}(p) = 1 \qquad A_{12}(p) = -(R_0 + L_0 p)$$

$$A_{21}(p) = -C_0 p \qquad A_{22}(p) = 1 + R_0 C_0 p + L_0 C_0 p^2$$

B.12 La charge à l'extrémité du câble est constituée d'un condensateur associé à une résistance en parallèle :



Écrire la matrice de transfert de la charge de la ligne, on notera [B] cette matrice.

$$\begin{bmatrix} V_s(p) \\ I_s(p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11}(p) & B_{12}(p) \\ B_{21}(p) & B_{22}(p) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_2(p) \\ I_2(p) \end{bmatrix} \quad \text{avec } [B] = \begin{bmatrix} B_{11}(p) & B_{12}(p) \\ B_{21}(p) & B_{22}(p) \end{bmatrix}$$

$$V_s(p) = V_2(p) \quad I_s(p) = I_2(p) - C_p V_2(p) - V_2(p)/R$$

doù : $B_{11}(p) = 1$ $B_{12}(p) = 0$

$$B_{21}(p) = -\left(\frac{1}{R} + C_p\right) \quad B_{22}(p) = 1$$

B.13 Écrire la matrice de transfert de la ligne notée [L] à l'aide des matrices [A] et [B], telle que :

$$\begin{bmatrix} V_s(p) \\ I_s(p) \end{bmatrix} = [L] \times \begin{bmatrix} V_1(p) \\ I_1(p) \end{bmatrix}$$

$$[L] = [B] \times [A]^n$$

B.14 En constatant que $I_s(p)$ est nul, écrire la fonction de transfert de la ligne notée $HL(p)$, à l'aide des éléments $L_{11}(p)$, $L_{12}(p)$, $L_{21}(p)$, $L_{22}(p)$ de la matrice de transfert totale [L] avec :

$$HL(p) = \frac{V_s(p)}{V_1(p)}$$

On notera : $[L] = \begin{bmatrix} L_{11}(p) & L_{12}(p) \\ L_{21}(p) & L_{22}(p) \end{bmatrix}$ $V_s(p) = L_{11} V_1(p) + L_{12} I_1(p)$
 $I_s(p) = L_{21} V_1(p) + L_{22} I_1(p)$

$I_s(p) = 0$ impose $I_1(p) = -\frac{L_{21}}{L_{22}} V_1(p)$

$$\frac{V_s(p)}{V_1(p)} = \frac{L_{11} L_{22} - L_{21} L_{12}}{L_{22}}$$

B.15 Les annexes 3 et 4 montrent les diagrammes de Bode de la fonction de transfert $HL(p)$ précédente (modèle de la ligne), pour 2 modèles différents, avec 2 et 10 cellules.

Déterminer les valeurs de R_0 , C_0 et L_0 pour ces deux modèles, comparer les résultats, et décrire quel pourrait être l'intérêt d'un tel modèle dans un enseignement.

2 cellules : $R_0 = 2,8 \Omega$, $L_0 = 14\text{mH}$, $C_0 = 21\mu\text{F}$ / cellule

10 cellules : $R_0 = 0,56 \Omega$, $L_0 = 2,8\text{mH}$, $C_0 = 4,2\mu\text{F}$ / cellule

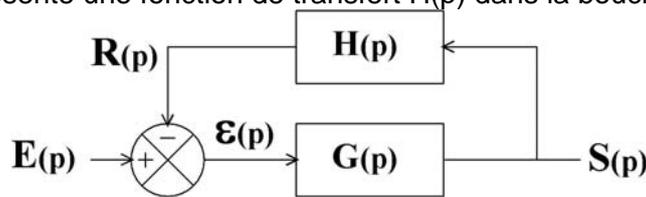
Plus le nombre de cellules est important, meilleure est la modélisation du câble,

Intérêt du modèle : simulation d'un câble

Partie C : régulation simplifiée du courant de ligne

C.I Étude d'une boucle de régulation

La boucle de régulation présente une fonction de transfert $H(p)$ dans la boucle de retour :



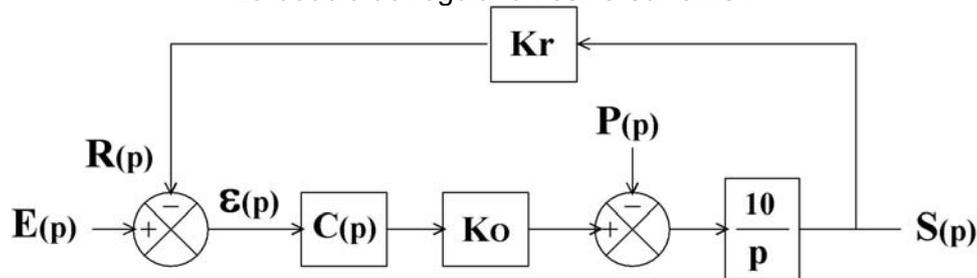
C.I.1 Donner l'expression de la fonction de transfert $T_{BO}(p)$ en boucle ouverte, avec

$$T_{BO}(p) = \frac{R(p)}{\varepsilon(p)} \qquad T_{BO}(p) = G(p)H(p)$$

C.I.2 Donner l'expression de la fonction de transfert $T(p)$ en boucle fermée.

$$\frac{S(p)}{E(p)} = \frac{G(p)}{1 + G(p)H(p)}$$

La boucle de régulation est la suivante :



Les courants sont mesurés à partir de sondes à effet Hall de gain K_r . On considèrera les valeurs numériques suivantes :

$K_r = 0,01 \text{ V/A}$ Gain du capteur de courant

$K_o = 40\,000$ Gain de l'onduleur

L'entrée $P(p)$ est une perturbation et l'entrée $E(p)$ une consigne.

Correction proportionnelle : $C(p) = K_p$

C.I.3 & C.I.4

L'entrée du bloc $10/p$ est nulle en régime permanent (intégration et $s(t)$ est constante), la sortie

du bloc K_o vaut alors P_0 , d'où $\varepsilon(\infty) = \frac{P_0}{K_o K_p}$

On remarquera qu'une constante ou un échelon ont les mêmes conséquences en régime permanent

C.I.5 Donner l'expression littérale de l'erreur $\varepsilon(p)$ en fonction de K_p , K_r , K_o , $E(p)$ et $P(p)$

$$\varepsilon(p) = \frac{E(p)}{1 + \frac{10}{p} K_o K_r K_p} + \frac{\frac{10}{p} K_r P(p)}{1 + \frac{10}{p} K_o K_r K_p}$$

C.I.6 Retrouver, à l'aide du théorème de la valeur finale cette fois, les résultats des questions C.I.3 et C.I.4

$$\varepsilon(\infty) = \lim_{p \rightarrow 0} (p\varepsilon(p))$$

On s'intéresse au comportement dynamique de l'asservissement. L'entrée de perturbation est constante : $P(p) = 0$.

C.I.7 Donner l'expression temporelle de la sortie $s(t)$ en réponse à un échelon d'entrée d'amplitude E_0 .

$$\frac{S(p)}{E(p)} = \frac{1}{K_r} \times \frac{1}{1 + \frac{p}{10K_0K_pK_r}} \quad s(t) = \frac{E_0}{K_r} \times (1 - e^{-t/\tau}) \quad \text{avec } \tau = \frac{1}{10K_0K_pK_r}$$

C.I.8 Donner l'expression du temps de réponse à 5%

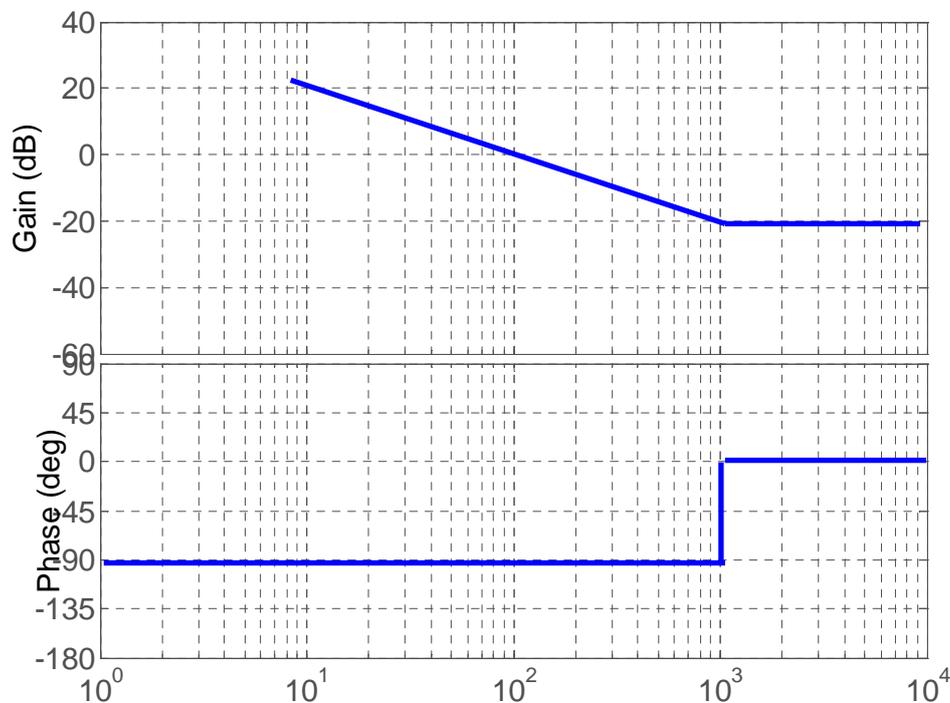
$$t_r = \tau \ln(20)$$

C.I.9 Déterminer la valeur numérique de K_p (gain du correcteur proportionnel) pour obtenir un temps de réponse à 5% de 20 ms

$$K_p = \frac{3}{10 \times 40000 \times 0,01 \times 20 \times 10^{-3}} = 0,0375$$

Correction proportionnelle et intégrale (PI) : $C(p) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i p} \right)$

C.I.10 Tracer sur le document réponse R5 le diagramme asymptotique de Bode de ce correcteur en précisant les valeurs particulières (on prendra pour le tracé $T_i = 1\text{ms}$ et $K_p = 0,1$).



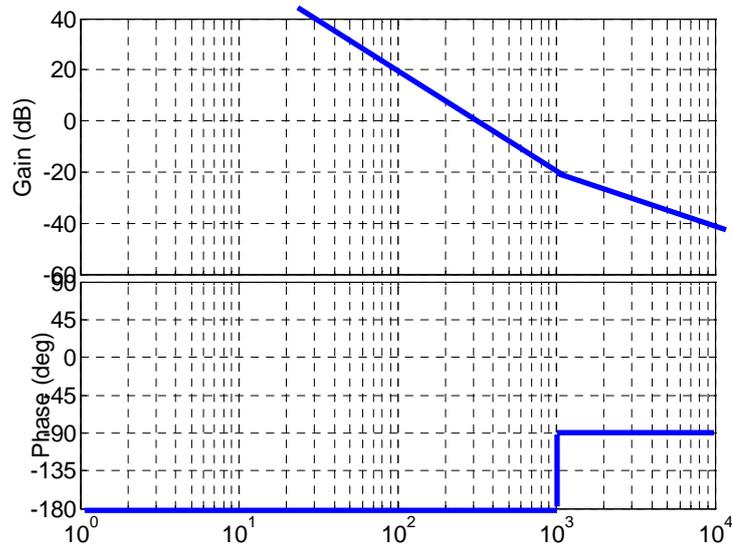
C.I.11 L'entrée de la boucle de régulation est constante, on applique un échelon de perturbation $P(p) = P_0 / p$, donner la valeur de l'erreur en régime permanent, justifier la réponse et justifier le rôle du correcteur PI.

Erreur nulle, grâce à l'intégration effectuée par le correcteur

C.I.12 Donner l'expression de la fonction de transfert $T_{BO}(p)$ en boucle ouverte en fonction de K_p , T_i , K_r , K_o .

$$T_{BO}(p) = K_p \frac{1 + T_i p}{T_i p} \times \frac{10K_o K_r}{p}$$

C.I.13 Tracer le diagramme de Bode asymptotique du système en boucle ouverte sur le document réponse R6

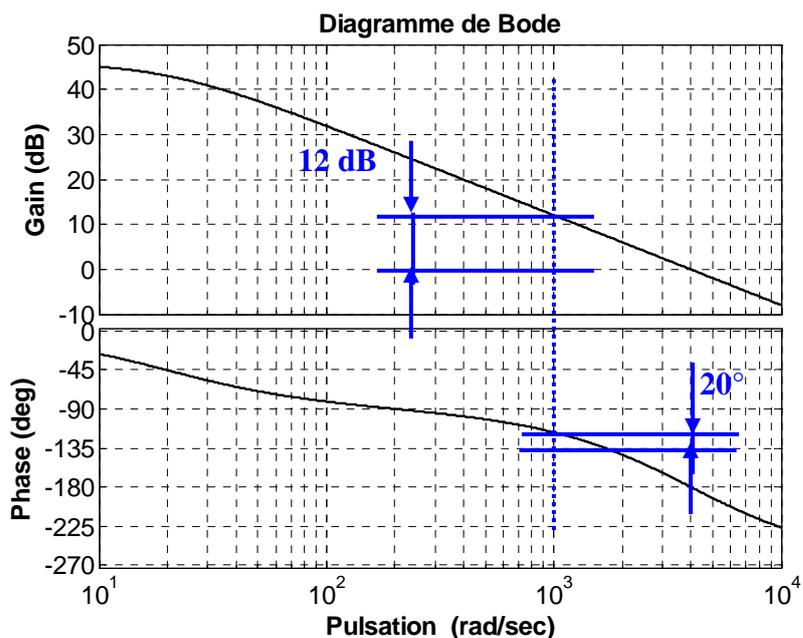


C.I.14 On cherche à obtenir une marge de phase de 45° à la pulsation de 1000 rad/s. Calculer les constantes K_p et T_i (on demande de déterminer les valeurs par le calcul, et non graphiquement).

$$|G| = 1 \text{ pour } \omega = 1/T_i \quad \text{avec } T_i = 1 \text{ ms} \quad K_p = \frac{1}{\sqrt{2} \times 10K_o K_r T_i} = 0,18$$

La fonction de transfert en boucle ouverte (sans correcteur inséré dans la boucle) est en pratique celle indiquée sur la feuille de réponse R7

C.I.15 On cherche encore à obtenir une marge de phase de 45° à la pulsation de 1 000 rad/s. Calculer la constante K_p du correcteur PI pour $T_i = 1\text{ms}$.



La solution ci-dessous considère la pulsation de coupure en boucle ouverte à 1000rd/s :

$$\begin{aligned} \text{Marge de Phase} &= 45^\circ, \text{ d'où} & \text{Arg}(\underline{C}) &= \text{Arctg}(T_i \omega) - 90^\circ = -20^\circ \quad T_i = 1,22 \text{ ms} \\ G = 12 \text{ dB}, \text{ Av} = 4, \text{ d'où} & & K_p \frac{\sqrt{1 + T_i \omega}}{T_i \omega} &= 1/4 \quad K_p = 0,16 \end{aligned}$$

Une autre solution consiste à fixer $T_i=1\text{ms}$ est à rechercher la pulsation de coupure.

C.II Étude d'un asservissement numérique de courant

C.II.1 Soit la fonction de transfert $R(p)$ définie ci-dessous :

$$R(p) = e^{-\tau p}$$

Indiquer ce que représente cette fonction de transfert : Retard pur

C.II.2 Compléter le document réponse R8 en donnant les valeurs numériques du module et de la phase exprimée en degré pour les pulsations indiquées.

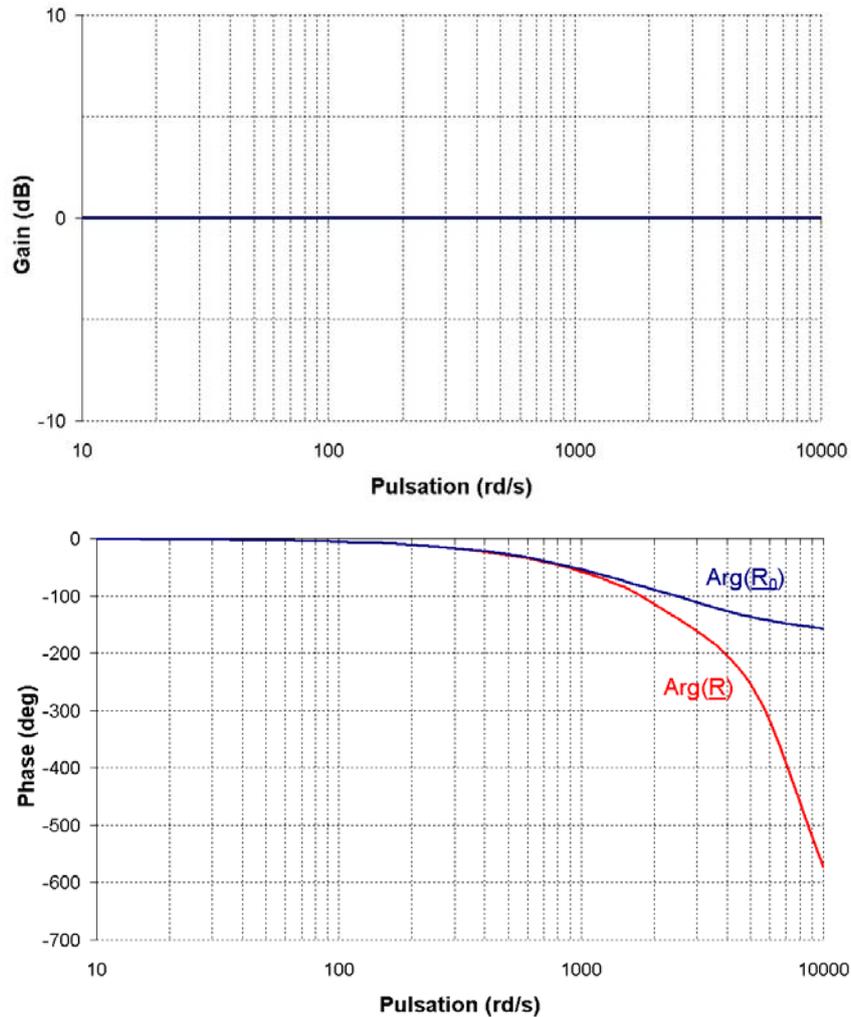
ω	$1/(100\tau)$	$1/(10\tau)$	$1/(\tau)$	$10/(\tau)$
$ \underline{R} $	1	1	1	1
$\text{Arg}(\underline{R})$	-0,57°	-5,7°	-57°	-573°

La fonction de transfert $R(p)$ est approchée par la fonction de transfert suivante $R_0(p)$: $R_0(p) = \frac{1 - \frac{\tau p}{2}}{1 + \frac{\tau p}{2}}$

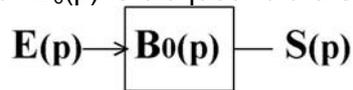
C.II.3 Compléter le document réponse R9 en donnant les valeurs numériques du module et de la phase de $R_0(p)$ pour les pulsations indiquées.

ω	$1/(100\tau)$	$1/(10\tau)$	$1/(\tau)$	$10/(\tau)$
$ R_0 $	1	1	1	1
$\text{Arg}(R_0)$	-0,57	-5,7	-53	-157

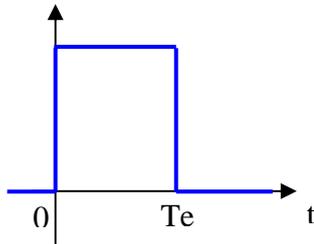
C.II.4 Tracer le diagramme de Bode de $R(p)$ et $R_0(p)$ sur le document réponse R10 en vous aidant des valeurs numériques indiquées dans les deux tableaux précédents, on prendra $\tau = 10 \mu\text{s}$ et donner les limites fréquentielles de l'approximation (la limite fréquentielle sera estimée lorsque l'écart entre les phases est supérieur à 45°).



Soit $B_0(p)$ le bloqueur d'ordre 0.



C.II.5 Rappeler la réponse d'un bloqueur d'ordre 0 à une impulsion de Dirac en entrée. On note T_e la période d'échantillonnage

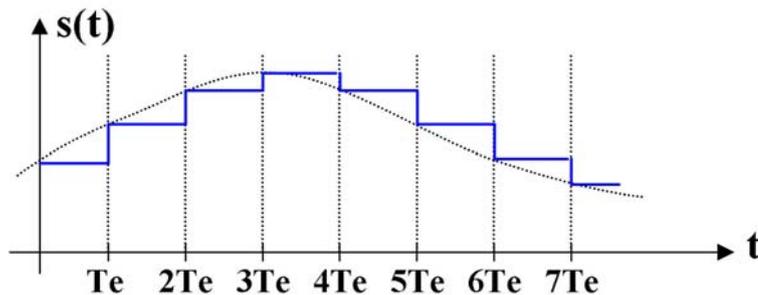


C.II.6 En déduire à partir de la transformée de Laplace, la fonction de transfert d'un bloqueur d'ordre 0.

On rappelle que $S(p) = \int_0^{\infty} s(t)e^{-pt} dt$

$$S(p) = \int_0^{T_e} e^{-pT_e} dt = \frac{1 - e^{-pT_e}}{p}$$

C.II.7 Compléter le document réponse R11 en indiquant la fonction réalisée par le bloqueur d'ordre 0 en représentant l'évolution temporelle de $s(t)$.



C.II.8 Donner l'expression de la fonction de transfert $B(p)$ du bloqueur d'ordre zéro.

On supposera pour cela (approximation de Padé) que : $e^{-pT_e} = \frac{1 - \frac{pT_e}{2}}{1 + \frac{pT_e}{2}}$

$$B(p) = \frac{T_e}{1 + \frac{pT_e}{2}}$$

C.II.9 Conclure sur la validité de l'approximation au regard des contraintes imposées sur la fréquence d'échantillonnage T_e .

Valide, au regard des périodes d'échantillonnage

C.II.10 Indiquer l'effet que peut avoir le bloqueur d'ordre 0 sur les performances de la régulation.

Effet destabilisateur

On cherche maintenant à décrire l'algorithme du correcteur proportionnel intégral implanté numériquement. On rappelle la fonction de transfert du correcteur PI ci dessous :

$$\mathbf{E(p)} \rightarrow \boxed{\mathbf{C(p)}} \rightarrow \mathbf{S(p)} \quad C(p) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i p} \right)$$

C.II.11 Écrire l'équation différentielle reliant $e(t)$, $\frac{de(t)}{dt}$ et $\frac{ds(t)}{dt}$

Les échantillons d'un signal $x(t)$ pris aux instant kT_e , $(k-1)T_e$, ... sont notés $x(k)$, $x(k-1)$, De plus, on calculera la dérivée du signal $x(t)$ aux instants kT_e par la relation suivante (Euler) :

$$\frac{dx(k)}{dt} = \frac{x(k) - x(k-1)}{T_e}$$

il vient :
$$T_i \frac{ds(t)}{dt} = K_p e(t) + K_p T_i \frac{de(t)}{dt}$$

C.II.12 Écrire l'équation récurrente permettant de calculer l'échantillon $s(k)$.

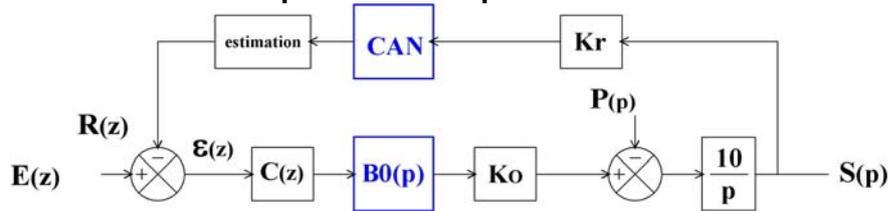
$$s_k = s_{k-1} + K_p \left(1 + \frac{T_e}{T_i} \right) e_k - K_p e_{k-1}$$

C.II.13 En déduire la fonction de transfert en z du correcteur PI.

$$C(z) = \frac{S(z)}{E(z)} = K_p \frac{1 + T_e / T_i - z^{-1}}{1 - z^{-1}}$$

Le correcteur de la boucle de courant est implanté numériquement.

C.II.14 Compléter le document réponse R12 en précisant le contenu des blocs.



C.II.15 L'échantillonneur bloqueur est généralement précédé d'un filtre passe-bas. Préciser l'intérêt de ce filtre.

Filtre anti-repliement

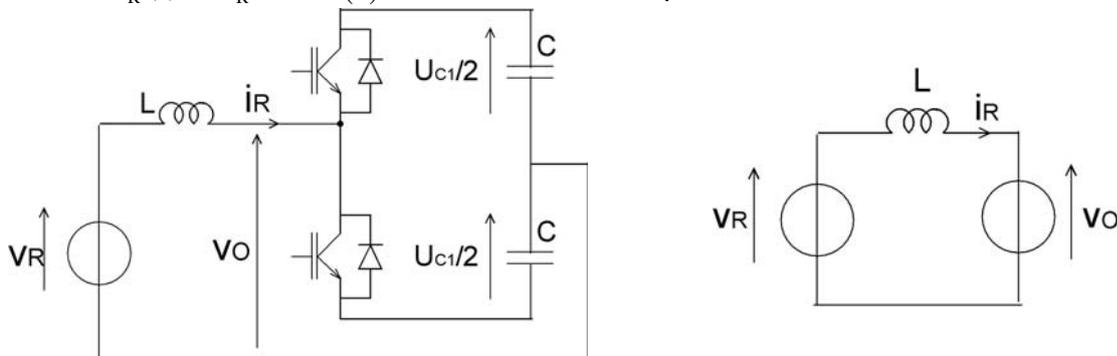
C.III Modélisation de la boucle de régulation en courant

Dans l'hypothèse simplificatrice où l'on néglige tout déséquilibre, les puissances actives et réactives consommées par l'onduleur de la station 1 s'écrivent :

$$P = 3V_R I_R \cos(\varphi)$$

$$Q = 3V_R I_R \sin(\varphi)$$

Dans ces mêmes hypothèses, l'étude de la régulation peut porter sur le schéma équivalent par phase suivant, avec $v_R(t) = V_R \sqrt{2} \cos(\theta)$ et $\theta = \omega t$, ω étant la pulsation du réseau alternatif.



En supposant une fréquence de découpage élevée, on suppose toujours que la tension v_o est parfaitement sinusoïdale pour le circuit v_R , L , v_o , et qu'elle s'écrit :

$$v_o(t) = V_o \sqrt{2} \cos(\theta - \psi)$$

Le courant réseau est mesuré par l'intermédiaire d'un capteur de courant de gain K_i . L'onduleur de tension se comporte vis-à-vis de sa commande comme un gain pur G_o .

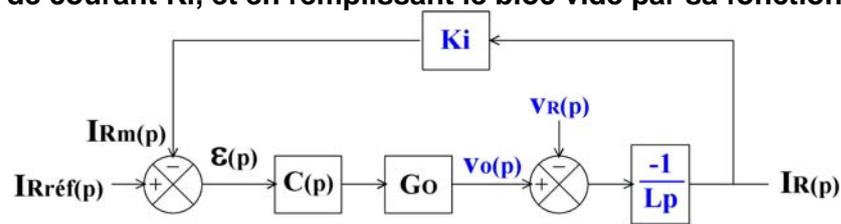
C.III.1 On cherche à mesurer une éventuelle composante continue sur le courant réseau, donner la technologie des capteurs à ne pas employer.

Transformateur d'intensité

C.III.2 En utilisant les variables de Laplace, exprimer la relation entre $I_R(p)$, $V_R(p)$ et $V_o(p)$.

$$I_R(p) = \frac{V_R(p) - V_o(p)}{Lp}$$

C.III.3 Compléter le document réponse R13 en faisant notamment apparaître sur la feuille de réponse, la tension réseau $V_R(p)$, la tension onduleur $V_o(p)$, le gain de la sonde de courant K_i , et en remplissant le bloc vide par sa fonction de transfert.



C.III.4 Donner l'expression numérique temporelle de la consigne en courant $i_{réf}(t)$ de sorte que le réseau triphasé fournisse une puissance de 50 MW, avec une puissance réactive nulle (on prendra $V_R = 46$ kV).

$$P = 3V_R I_R \text{ d'où } I_R = 362\text{A} \quad \text{et} \quad i_{réf}(t) = 512 \cos(\omega t)$$

C.III.5 Donner dans ces mêmes conditions l'expression de $v_o(t)$, en précisant sa valeur efficace et son déphasage par rapport à $v_R(t)$, on prendra $L = 100$ mH

$$v_o(t) = V_o \sqrt{2} \cos(\theta - \psi) \quad \text{avec :} \quad V_o = \sqrt{V_R^2 + (L\omega I_R)^2} = 47,4 \text{ kV}$$

$$\text{tg}\psi = \frac{L\omega I_R}{V_R} \quad \psi = 13,5^\circ$$

C.III.6 Préciser la principale différence entre l'étude qu'il faudrait porter au correcteur dans ce cas, et celle effectuée dans la partie C.I

Suivi d'une trajectoire

La commande de l'onduleur nécessite en pratique d'estimer très précisément la pulsation du réseau et plus particulièrement sa phase.

C.1II.7 Proposer un dispositif permettant de connaître et de suivre la phase des tensions réseau.

Une solution consiste à utiliser une boucle à verrouillage de phase

Partie D : modèle de la station 1

Soit le système triphasé direct de tension suivant :

$$v_{oA}(t) = V_o \sqrt{2} \cos(\theta - \psi)$$

$$v_{oB}(t) = V_o \sqrt{2} \cos(\theta - 2\pi/3 - \psi)$$

$$v_{oC}(t) = V_o \sqrt{2} \cos(\theta + 2\pi/3 - \psi)$$

Ce réseau triphasé peut s'écrire sous forme matricielle de la façon suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{oA} \\ V_{oB} \\ V_{oC} \end{bmatrix} = V_o \sqrt{2} \sqrt{\frac{3}{2}} \times [T_{32}] \times [R(\theta - \psi)] \times \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$[T_{32}] \text{ est la matrice de Concordia et s'écrit : } [T_{32}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}$$

$$[R(\theta)] \text{ est la matrice de rotation et s'écrit : } [R(\theta)] = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

D.1 Vérifier que la matrice $[T_{32}]$ est normée en démontrant la relation suivante :

$$[T_{32}^T] \times [T_{32}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

On peut également montrer que la matrice inverse de $[R(\theta)]$ s'écrit :

$$[R(\theta)]^{-1} = [R(-\theta)]$$

Un système triphasé sans composante homopolaire peut être remplacé par un système diphasé de même pulsation (conservation des puissances actives et réactives). Ce passage est symbolisé par la transformation T_{32} . Une rotation de pulsation ω (pulsation réseau) appliquée au système diphasé permet de s'affranchir du temps. Par conséquent, après cette deuxième transformation les grandeurs V_d et V_q obtenues sont des tensions continues. La transformation peut être appliquée aux courants également et la puissance est conservée.

Un système triphasé sans composante homopolaire (système direct et inverse) peut alors se mettre sous la forme générale suivante :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = [T_{32}] \times [R(\omega t + \varphi)] \times \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix}$$

V_d et V_q sont des grandeurs continues lorsque $\theta = \omega t$, avec ω la pulsation du réseau.

D.2 Montrer la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = [R(-\omega t - \varphi)] \times [T_{32}^T] \times \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = [T_{32}] \times [R(\omega t + \varphi)] \times \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} \quad \text{d'où, } [T_{32}^T] \times \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = [R(\omega t + \varphi)] \times \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix}$$

$$\text{d'où, } [R(-\omega t - \varphi)] \times [T_{32}^T] \times \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix}$$

D.3 En appliquant cette relation au système triphasé direct présenté en début de cette partie ($v_{OA}(t)$, $v_{OB}(t)$, $v_{OC}(t)$), en remarquant que $\theta = \omega t$ et pour $\varphi = 0$, exprimer V_{Od} et V_{Oq} .

$$\begin{bmatrix} V_{od} \\ V_{oq} \end{bmatrix} = [R(-\omega t)] \times [T_{32}^T] \times \begin{bmatrix} V_{OA} \\ V_{OB} \\ V_{OC} \end{bmatrix}, \text{ avec } \begin{bmatrix} V_{OA} \\ V_{OB} \\ V_{OC} \end{bmatrix} = V_0 \sqrt{2} \sqrt{\frac{3}{2}} \times [T_{32}] \times [R(\omega t - \psi)] \times \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{d'où } \begin{bmatrix} V_{od} \\ V_{oq} \end{bmatrix} = V_0 \sqrt{3} \times [R(-\psi)] \times \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

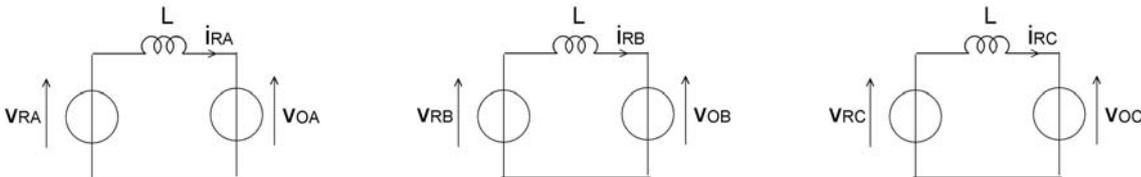
$$\text{d'où } \begin{aligned} V_{od} &= \sqrt{3} V_0 \cos \psi \\ V_{oq} &= -\sqrt{3} V_0 \sin \psi \end{aligned}$$

D.4 À partir du résultat précédent, écrire les grandeurs continues, respectivement, V_{Rd} , V_{Rq} et I_{Rd} , I_{Rq} des grandeurs triphasées v_{RA} , v_{RB} , v_{RC} et i_{RA} , i_{RB} , i_{RC} .

$$V_{Rd} = \sqrt{3} V_R \quad I_{Rd} = \sqrt{3} I_R \cos \varphi$$

$$V_{Rq} = 0 \quad I_{Rq} = -\sqrt{3} I_R \sin \varphi$$

D.5 On reprend maintenant la modélisation du courant réseau, mais de façon triphasée cette fois ; en décomposant le système triphasé en trois réseaux monophasés indépendants tels que présentés ci-dessous :



Écrire les trois équations instantanées indépendantes permettant de relier la dérivée temporelle des courants de ligne i_{RA} , i_{RB} , i_{RC} aux tensions v_{RA} , v_{RB} , v_{RC} et v_{OA} , v_{OB} , v_{OC} .

$$L \frac{di_{RA}}{dt} = v_{RA} - v_{OA}$$

$$L \frac{di_{RB}}{dt} = v_{RB} - v_{OB}$$

$$L \frac{di_{RC}}{dt} = v_{RC} - v_{OC}$$

D.6 Montrer, qu'après application des matrices de Concordia et de rotation, ces trois équations peuvent s'écrire sous la forme matricielle suivante :

$$[R(\theta)] \times \begin{bmatrix} V_{Rd} \\ V_{Rq} \end{bmatrix} - [R(\theta)] \times \begin{bmatrix} V_{Od} \\ V_{Oq} \end{bmatrix} = L \times \frac{d}{dt} \left([R(\theta)] \times \begin{bmatrix} i_{Rd} \\ i_{Rq} \end{bmatrix} \right)$$

$$\begin{bmatrix} V_{RA} \\ V_{RB} \\ V_{RC} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{OA} \\ V_{OB} \\ V_{OC} \end{bmatrix} = L \begin{bmatrix} \frac{di_{RA}}{dt} \\ \frac{di_{RB}}{dt} \\ \frac{di_{RC}}{dt} \end{bmatrix} = L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{RA} \\ i_{RB} \\ i_{RC} \end{bmatrix} \quad \text{il vient}$$

$$[T_{32}] [R(\theta)] \times \begin{bmatrix} V_{Rd} \\ V_{Rq} \end{bmatrix} - [T_{32}] [R(\theta)] \times \begin{bmatrix} V_{Od} \\ V_{Oq} \end{bmatrix} = L \times \frac{d}{dt} \left([T_{32}] [R(\theta)] \times \begin{bmatrix} i_{Rd} \\ i_{Rq} \end{bmatrix} \right) \quad \text{d'où, l'équation recherchée}$$

D.7 En utilisant la relation matricielle suivante :

$$\frac{d}{dt} \left([\mathbf{R}(\theta)] \times \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{Rd} \\ \mathbf{I}_{Rq} \end{bmatrix} \right) = \frac{d}{dt} [\mathbf{R}(\theta)] \times \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{Rd} \\ \mathbf{I}_{Rq} \end{bmatrix} + [\mathbf{R}(\theta)] \times \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{Rd} \\ \mathbf{I}_{Rq} \end{bmatrix}$$

et en constatant que : $\frac{d}{dt} [\mathbf{R}(\theta)] = \omega [\mathbf{R}(\theta + \frac{\pi}{2})]$

Montrer que les grandeurs continues associées aux grandeurs triphasées des tensions et courants respectent la relation matricielle suivante :

$$[\mathbf{V}_{RP}] - [\mathbf{V}_{OP}] = L\omega \times [\mathbf{R}(-\theta)] \times [\mathbf{R}(\theta + \frac{\pi}{2})] \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{Rd} \\ \mathbf{I}_{Rq} \end{bmatrix} + L \times \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{Rd} \\ \mathbf{I}_{Rq} \end{bmatrix}$$

D.8 Montrer alors que les grandeurs continues des tensions et courants peuvent s'écrire de la manière suivante :

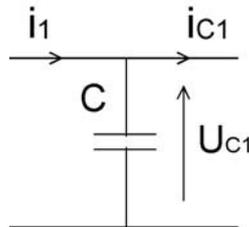
$$\mathbf{V}_{Rd} - \mathbf{V}_{Od} = L \frac{d(\mathbf{I}_{Rd})}{dt} - L\omega \mathbf{I}_{Rq}$$

$$\mathbf{V}_{Rq} - \mathbf{V}_{Oq} = L \frac{d(\mathbf{I}_{Rq})}{dt} + L\omega \mathbf{I}_{Rd}$$

que l'on peut écrire également sous la forme suivante :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{Rd} \\ \mathbf{I}_{Rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega \\ -\omega & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{Rd} \\ \mathbf{I}_{Rq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{Rd} - \mathbf{V}_{Od} \\ \mathbf{V}_{Rq} - \mathbf{V}_{Oq} \end{bmatrix}$$

On cherche maintenant un modèle pour le contrôle de la tension U_{C1} de sortie du convertisseur. On note i_1 , le courant de sortie du convertisseur et i_{C1} le courant dans le câble.



D'autre part, on considère les grandeurs de commande du convertisseur, notées m_d et m_q , telles que :

$$\mathbf{V}_{Od} = m_d \frac{u_{C1}}{2}$$

$$\mathbf{V}_{Oq} = m_q \frac{u_{C1}}{2}$$

On utilisera également la propriété de conservation de la puissance des transformations utilisées, propriété se traduisant par l'équation suivante :

$$u_{C1} \times i_1 = \mathbf{V}_{Od} \times i_{Rd} + \mathbf{V}_{Oq} \times i_{Rq}$$

D.9 En utilisant la conservation de la puissance instantanée entre entrée et sortie du convertisseur, écrire la relation reliant i_1 à i_{rd} , i_{rq} , m_d et m_q .

$$\mathbf{V}_{Od} = m_d \frac{u_{C1}}{2} \quad \mathbf{V}_{Oq} = m_q \frac{u_{C1}}{2} \quad \text{d'où}$$

$$i_1 = \frac{m_d i_{Rd}}{2} + \frac{m_q i_{Rq}}{2}$$

D.10 En appliquant la loi des nœuds à la figure précédente, montrer que l'évolution de la tension aux bornes de C peut se mettre sous la forme suivante :

$$\beta \frac{d(u_{Cl})}{dt} = i_{Rd} + i_E$$

$$C \frac{d(u_{Cl})}{dt} = i_1 - i_{Cl} = \frac{m_d i_{Rd}}{2} + \frac{m_q i_{Rq}}{2} - i_{Cl} \text{ d'où}$$

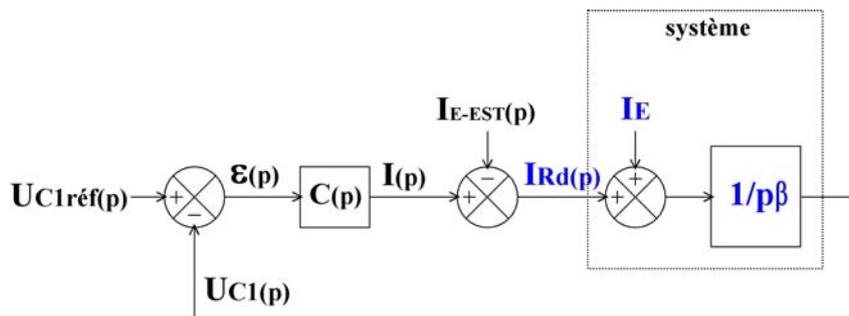
$$\frac{2C}{m_d} \frac{d(u_{Cl})}{dt} = i_{Rd} + \frac{m_q i_{Rq}}{m_d} - \frac{2i_{Cl}}{m_d}$$

D.11 Donner les expressions de β et i_E .

$$\beta = \frac{2C}{m_d} \quad i_E = \frac{m_q i_{Rq}}{m_d} - \frac{2i_{Cl}}{m_d}$$

On note : $i = i_{Rd} + i_E$

D.12 Le document réponse R14 représente le schéma bloc de la boucle de régulation intégrant également le modèle du système. Compléter le document réponse R14 en rajoutant dans la modélisation du système, l'entrée sur l'additionneur et la fonction de transfert du bloc vide.



Partie E : modèle d'état de la boucle de courant et régulation du courant de ligne au sens des variables d'état

Un système modélisé sous la forme d'une représentation d'état peut s'écrire de la façon suivante :

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= [A] \times [x(t)] + [B] \times [e(t)] \\ s(t) &= [C] \times [x(t)] + [D] \times [e(t)] \end{aligned}$$

Dans la première équation, la matrice d'état [A] garantit la stabilité du système. La matrice [C] de la seconde équation est la matrice d'observation (mesure).

$[x(t)]$ est le vecteur d'état
 $\dot{x}(t) = \left[\frac{dx(t)}{dt} \right]$ est la dérivée du vecteur d'état
 $[e(t)]$ est le vecteur de commande
 $[s(t)]$ est le vecteur de sortie
 $[B]$ est la matrice de commande

La modélisation de l'évolution des courants I_{Rd} et I_{Rq} , écrite à la question D.8 est rappelée et simplifiée ici dans le cas où la tension réseau est prise comme origine des phases ($V_{Rq} = 0$).

$$\begin{aligned} V_{Rd} - V_{Od} &= L \frac{d(I_{Rd})}{dt} - L\omega I_{Rq} \\ -V_{Oq} &= L \frac{d(I_{Rq})}{dt} + L\omega I_{Rd} \end{aligned}$$

Le vecteur d'état $[x(t)]$ s'écrit : $[x(t)] = \begin{bmatrix} I_{Rd} \\ I_{Rq} \end{bmatrix}$

Les grandeurs de commande de l'onduleur triphasées notées m_d et m_q contrôlent respectivement les composantes V_{Od} et V_{Oq} du réseau triphasé de tensions à l'entrée du convertisseur, v_{OA} , v_{OB} , v_{OC} . Il vient :

$$\begin{aligned} V_{Od} &= m_d \frac{U_{c1}}{2} \\ V_{Oq} &= m_q \frac{U_{c1}}{2} \end{aligned}$$

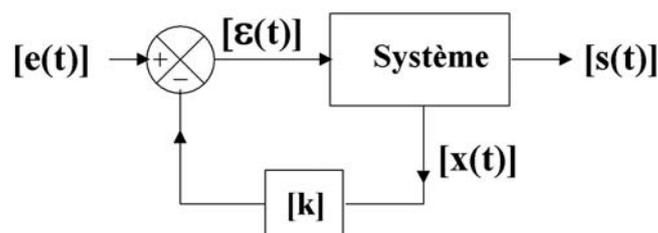
Le vecteur de commande $[e(t)]$ sera le vecteur suivant : $[e(t)] = \begin{bmatrix} m_d - \frac{2V_{Rd}}{U_{c1}} \\ m_q \end{bmatrix}$

On ne s'intéresse dans cette partie qu'à la stabilité de la boucle de courant et seule la première équation sera considérée par la suite.

$$\dot{x}(t) = [A] \times [x(t)] + [B] \times [e(t)]$$

E.1 À partir des vecteurs d'état et de commande, donner les expressions des composantes des matrices [A] et [B], qui sont toutes deux des matrices 2x2.

Le système est ensuite bouclé par une matrice de gain [k] 2x2, les vecteurs d'état et de commande étant de rang 2.



$$\frac{di_{Rd}}{dt} = \omega i_{Rq} - \frac{U_{Cl}}{2L} \left(m_d - 2 \frac{V_{Rd}}{U_{Cl}} \right)$$

$$\frac{di_{Rq}}{dt} = -\omega i_{Rd} - \frac{U_{Cl}}{2L} m_q$$

$$[A] = \begin{bmatrix} 0 & \omega \\ -\omega & 0 \end{bmatrix} \quad [B] = \begin{bmatrix} -\frac{U_{Cl}}{2L} & 0 \\ 0 & -\frac{U_{Cl}}{2L} \end{bmatrix}$$

E.2 À partir de l'expression temporelle $\dot{x}(t) = [A] \times [x(t)] + [B] \times [\varepsilon(t)]$, montrer que la transformée de Laplace $[X(p)]$ de $[x(t)]$ peut s'écrire :

$$[X(p)] = (p \times [I] - [A])^{-1} \times [B] \times \varepsilon(p)$$

avec p la variable de Laplace et $[I]$ la matrice identité, $[I] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$

de $\dot{x}(t) = [A] \times [x(t)] + [B] \times [\varepsilon(t)]$, on écrit après transformation de Laplace :

$$p[X(p)] = [A] \times [X(p)] + [B] \times [\varepsilon(p)] \text{ d'où } (p[I] - [A])[X(p)] = [B] \times [\varepsilon(p)]$$

d'où l'équation recherchée

Soit $P^*(p)$ le polynôme caractéristique définit par :

$$P^*(p) = \det\{p \times [I] - [A] + [B] \times [k]\}$$

Les pôles de la fonction de transfert en boucle fermée sont les racines de l'équation caractéristique précédente, valeurs de p (variable de Laplace) pour lesquelles le polynôme caractéristique est nul.

On prendra une matrice de gain $[k]$ de la forme suivante : $[k] = \begin{bmatrix} k_1 & k_2 \\ -k_2 & k_1 \end{bmatrix}$

E.3 Écrire le polynôme caractéristique $P^*(p)$ sous la forme suivante :

$$P^*(p) = p^2 + \alpha_1 p + \alpha_2$$

$$\det \begin{bmatrix} p - \frac{U_{Cl}}{2L} k_1 & -\left(\omega + \frac{U_{Cl}}{2L} k_2 \right) \\ \omega + \frac{U_{Cl}}{2L} k_2 & p - \frac{U_{Cl}}{2L} k_1 \end{bmatrix} = p^2 - \frac{U_{Cl} k_1}{L} p + \omega^2 + \frac{U_{Cl}^2}{4L^2} (k_1^2 + k_2^2) + 2\omega \frac{U_{Cl}}{2L} k_2$$

E.4 Donner les expressions de α_1 et α_2 .

$$\alpha_1 = -\frac{U_{Cl} k_1}{L}$$

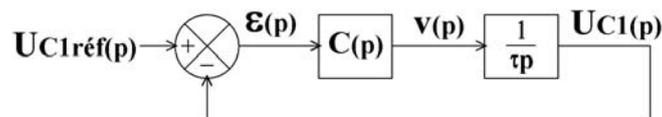
$$\alpha_2 = \omega^2 + \frac{U_{Cl}^2}{4L^2} (k_1^2 + k_2^2) + 2\omega \frac{U_{Cl}}{2L} k_2$$

E.5 Conclure sur l'intérêt d'une commande par retour d'état.

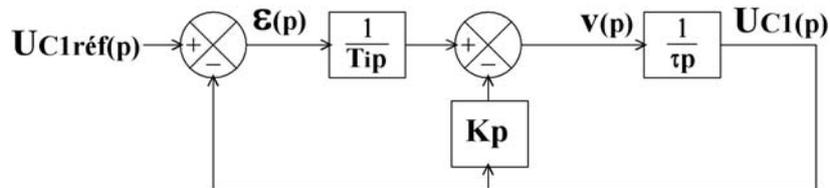
Placement de pôle

Partie F : régulation de la tension de sortie de la station 1

La boucle de tension fait apparaître le schéma fonctionnel suivant :



Le correcteur retenu est de type proportionnel intégral sans zéro dont l'architecture est présentée ci-dessous :



F.1 Donner l'expression des coefficients T_i et K_p du correcteur permettant d'obtenir en boucle fermée une réponse du second ordre du type :

$$\frac{U_{C1}(p)}{U_{C1réf}(p)} = \frac{1}{1 + \frac{2mp}{\omega_0} + \frac{p^2}{\omega_0^2}}$$

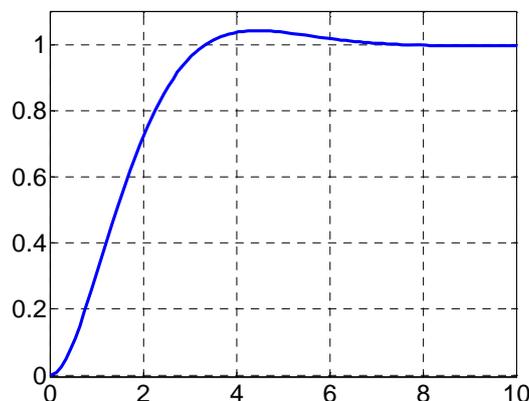
On choisit les constantes T_i et K_p afin d'obtenir $m = 1/\sqrt{2}$ et une bande passante à -3 dB valant 10 Hz.

$$\frac{U_{C1}(p)}{U_{C1réf}(p)} = \frac{1}{1 + K_p T_i p + \tau T_i p^2}$$

F.2 Donner l'expression de m et ω_0 en fonction de T_i , K_p et τ .

$$m = \frac{K_p}{2} \sqrt{\frac{T_i}{\tau}} \qquad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{\tau T_i}}$$

F.3 Tracer l'allure de la réponse à un échelon de consigne sur le document réponse R15, on ne demande pas d'indications numériques, simplement une allure.



F.4 Calculer la pulsation ω_0 .

$$\omega = \omega_0 = 63 \text{ rd/s}$$

F.5 Donner le temps de réponse à 5% de la boucle de tension.

$$t_R = 3/\omega_0 = 47,6 \text{ ms}$$

Rapport sur l'épreuve d'automatique de l'agrégation interne de génie électrique 2006 (6 heures)

Le jury conseille aux candidats de lire entièrement le sujet pour traiter en priorité les parties qui leur semblent les plus abordables. La clarté de la rédaction, la rigueur scientifique dans le développement des étapes d'une démonstration est évaluée.

Partie A : Contrôle de l'énergie

La partie A mettait en situation pour l'étude du système. Les quelques connaissances requises appartenaient au domaine du génie électrique. Cette partie n'a été abordée que par 50% des candidats. L'analyse du principe de fonctionnement n'est que très rarement menée. Le jury remarque :

- L'unité de puissance réactive est trop souvent inconnue, omise ou erronée,
- La trigonométrie, l'équation du cercle, la construction de Fresnel et les calculs associés ne sont pas maîtrisés.

Partie B : Modélisation du câble

Cette partie permettait d'élaborer différents modèles de câbles dont on comparait la concordance avec le câble réel. Elle a été abordée par 60% des candidats. Ceux-ci ont rencontré des difficultés calculatoires importantes sur les questions B2 et B3. Le jury souligne qu'il est inutile de construire une fausse démonstration pour arriver au résultat. Le jury s'est appliqué en particulier à évaluer la rigueur et la qualité rédactionnelle de la démonstration puisque le résultat était connu... La suite de la partie B était indépendante de ces premières questions.

Partie C : Régulation simplifiée du courant en ligne

Cette partie était de l'automatique élémentaire dont les thèmes ont déjà été abordés dans les sujets des sessions précédentes. Il s'agissait du cœur du sujet, aussi est-il regrettable que de nombreux candidats ne l'aient pas suffisamment traitée. La notion de marge de phase (C.I) est trop souvent mal connue. Il est indispensable de maîtriser le tracé des diagrammes de Bode. La partie numérique (C.II), lorsqu'elle a été abordée, a été bien traitée. La partie CIII ne présentait aucune difficulté majeure et n'a été malheureusement que trop rarement abordée.

Partie D : Modèle de la station 1

La modélisation de l'asservissement des courants réseaux utilisait la transformation de Concordia qui ne constituait pas un pré-requis. Toutes les informations nécessaires sur la transformation étaient données dans le sujet. Cette partie a été très peu traitée alors qu'elle ne présentait aucune difficulté. Le jury note que les candidats de l'option B n'ont pas mieux réussi cette partie alors qu'ils devraient normalement être familiarisés avec ces notations utilisées en commande vectorielle des machines.

Partie E : Modèle d'état

Cette mise en équation sous forme d'état de la boucle de courant ne nécessitait pas de connaissance particulière. Cependant très peu de candidats l'ont abordée. Le jury rappelle que la *représentation d'état des systèmes linéaires stationnaires* est au programme de l'agrégation. Il est donc fortement conseillé aux candidats de s'y référer.

Partie F : Régulation de la tension de sortie de la station 1

Cette dernière partie était très classique, les rares candidats qui l'ont traitée l'ont réussi avec succès. Il est toutefois regrettable de voir que certains candidats ne savent pas tracer la réponse indicielle d'un système du second ordre.

PREMIÈRE ÉPREUVE D'ADMISSION

COMMENTAIRES DU JURY

Les candidats se reporteront utilement à la définition de l'épreuve en début de rapport.

Cette épreuve doit permettre aux candidats de démontrer qu'ils sont capables de proposer une exploitation pédagogique cohérente et pertinente d'un dossier technique dont ils doivent absolument maîtriser les aspects scientifiques et techniques. Elle est destinée essentiellement à évaluer l'aptitude pédagogique à exercer le métier d'enseignement. Il est notamment attendu d'eux qu'ils soient capables de :

- faire une présentation fonctionnelle cohérente et suffisamment complète du système technique qu'ils ont choisi afin de mettre en situation la (les) question(s) traitée(s). Pour cela les outils de description fonctionnelle doivent être judicieusement choisis et maîtrisés ;
- choisir et de présenter un problème technique significatif de l'intérêt du système, ainsi que la solution mise en œuvre pour le résoudre dans le cadre du référentiel choisi (baccalauréats, brevet de technicien supérieur, institut universitaire de technologie ou classes préparatoires) ;
- réfléchir sur la manière dont s'articulent les différents contenus de formation (pré - acquis et pré - requis) ;
- choisir et justifier la démarche ainsi que les outils pédagogiques utilisés, en fonction des objectifs visés ;
- réfléchir aux techniques d'évaluation.

Cette épreuve doit aussi permettre d'apprécier la connaissance qu'ont les candidats du milieu industriel et notamment des domaines d'activité des techniciens supérieurs qu'ils auront mission de former.

Le jury est très sensible à l'originalité du support retenu. Il apprécie également que les candidats fassent preuve d'une bonne connaissance des évolutions technologiques.

Les observations des commissions

Si certains candidats ont parfaitement réussi cette épreuve, de nombreuses prestations souffrent des insuffisances suivantes :

- **Concernant la partie technique du dossier :**
 - Celle-ci doit présenter les points essentiels du cahier des charges industriel original.
 - L'étude technique est une analyse scientifique et technologique des solutions retenues par le concepteur. Ce n'est pas une compilation de documents. Les candidats doivent illustrer une problématique essentielle du support présenté ;
 - En électronique, les systèmes retenus ne doivent pas faire appel à des solutions technologiques de plus de dix ans. La description fonctionnelle est incontournable. Elle doit permettre d'apprécier facilement l'organisation et le fonctionnement du système ;
 - Les documents constructeurs (schémas, algorithme, Etc.) fournis dans le dossier doivent être lisibles. Seuls les documents essentiels à la compréhension de l'exploitation pédagogique doivent être fournis. De plus, un dossier complémentaire de documentation peut être amené par le candidat le jour de sa prestation ;
 - Le jury note trop souvent l'absence de donnée (performance, contrainte, etc.) issue du cahier des charges et trop souvent la méconnaissance des phénomènes physiques mis en œuvre et exploités dans le système ;
 - le manque d'initiative et de curiosité scientifique empêche le candidat d'avoir un esprit critique dans les choix technologiques.

- **Concernant la partie pédagogique du dossier le jury constate :**
 - l'absence de documents destinés aux élèves tels que textes de T.P., documents d'appui, etc. ;
 - l'absence de description des conditions matérielles de mise en œuvre des T.P. (schémas de câblage, appareils de mesure, etc.). Ces documents permettraient aux élèves d'appréhender le T.P. dans de bonnes conditions ;
 - la présence de documents redondants ;
 - l'absence de cohérence entre le système étudié et les objectifs pédagogiques visés ;
 - que l'orthographe et la syntaxe sont trop souvent défailtantes ;
 - la confusion entre objectif et travail demandé, savoir et savoir-faire ;
 - la distinction entre éléments d'évaluation et critères d'évaluation qui doivent être définis en termes de performances attendues ;
 - que l'exploitation pédagogique est éloignée de la structure réelle de l'objet technique, et que les candidats inventent trop souvent des scénarios irréalistes autour de l'application industrielle ;
 - que les supports didactiques utilisés révèlent rarement la complexité et le comportement du système réel.

- **Concernant les exposés le jury constate :**
 - que les documents projetés ne sont pas toujours bien utilisés et apparaissent — encore parfois — de mauvaise qualité et non lisibles ;
 - que les exposés ne sont pas toujours bien préparés ;
 - que les techniques, autres que celles de la spécialité, sont mal connues et quelquefois délibérément ignorées ;
 - que l'analyse scientifique de la problématique posée ne met pas en valeur un certain nombre de pistes de formation ;

Les conseils des commissions :

- **Choix du support et du dossier :**

Les constatations précédentes montrent à l'évidence que les candidats n'apportent pas tout le soin nécessaire à la préparation de cette épreuve. Les candidats doivent donc s'efforcer de trouver des objets techniques utilisant des composants **non obsolètes** et ils doivent comprendre que **la préparation et la mise en forme de ce dossier nécessitent plusieurs mois de recherches et de réflexions**. Les dossiers ne peuvent s'improviser dans la confusion des quelques jours qui séparent les épreuves d'admissibilité des épreuves d'admission.

Le jury apporte une attention toute particulière à **l'originalité et à l'authenticité du support proposé**. Il souhaite que les candidats s'appuient sur un support technique issu des entreprises. Trop de candidats, réutilisent des supports académiques, sans avoir approché les réalités et les exigences industrielles.

La production d'un objet technique ou d'un pseudo système conçu intégralement par le candidat est sévèrement sanctionnée par le jury.

Plusieurs candidats ont repris avec les mêmes erreurs leur dossier de l'année à laquelle ils ont été admissibles. Le jury conseille aux candidats non admis qui ont obtenu une note inférieure à la moyenne à cette épreuve de changer de support et d'y apporter les applications pédagogiques demandées.

- **L'exploitation des travaux :**

Le support technique est un système industriel ou un objet technique issu d'un système ou un produit du domaine des biens et services. Les schémas fonctionnels et structurels (et logiciels si nécessaire) doivent figurer dans le dossier. Ces derniers permettent d'avoir une vision globale du support et de replacer la partie étudiée par le candidat dans son contexte fonctionnel et structurel.

Les exploitations pédagogiques proposées aux élèves ou étudiants s'appuient obligatoirement sur le support étudié.

Les électroniciens étudieront les schémas du concepteur sans aucune modification dans un premier temps. Les réalisations doivent aller dans le sens de l'évolution technologique.

Les électrotechniciens apporteront un soin particulier à la similitude¹ entre le système réel étudié et l'application pédagogique. Celle-ci ne doit pas s'éloigner du comportement du système réel.

Dans tous les cas, les applications pédagogiques s'inscrivent dans l'étude du système. **Ces applications valident les solutions techniques retenues par le concepteur en faisant un retour sur le cahier des charges.** Le candidat doit faire un travail d'appropriation du dossier technique en liaison avec les contraintes industrielle certes, mais c'est le travail de conception du dossier pédagogique et des séquences d'apprentissages, notamment les TP proposés aux étudiants ou élèves que le jury apprécie.

Lors de l'exposé, le jury apprécie que le candidat utilise et maîtrise les outils modernes de présentation. A cet effet, le candidat dispose d'un ordinateur et d'un vidéo-projecteur. Le candidat ne doit pas confondre aspect didactique et aspect ludique de la formation.

Encore, quelques candidats ne font pas la démonstration qu'ils ont réellement mis en œuvre et exploité les systèmes et les séquences pédagogiques qu'ils décrivent. **On conseille aux candidats de se rapprocher des sections visées par leurs objectifs pédagogiques.** Les candidats qui enseignent dans plusieurs classes doivent choisir celle qui est la plus adaptée pour la séquence pédagogique.

¹ En effet, la transposition didactique doit respecter pour l'essentiel le comportement et l'architecture du système étudié. Par exemple, dans le cas d'un équipement de motorisation, l'allure du couple résistant exercé par la charge devra être respectée, un ventilateur ou une pompe ne peuvent pas en effet être modélisés par un couple indépendant de la vitesse. D'une manière générale, le rapport des inerties entre un moteur et sa charge devra autant que possible être reproduit sur le système ou le sous-système didactique

SECONDE ÉPREUVE D'ADMISSION
Option A : Électronique et informatique industrielle
COMMENTAIRES DU JURY

A - ORGANISATION DE L'ÉPREUVE

Depuis la session de 2002 les calculatrices personnelles sont interdites. Une calculatrice de base est fournie par le centre d'examen.

Pour la session 2006, l'épreuve de travaux pratiques conserve la durée et la structure de celle de 2005.

L'épreuve se déroule en deux parties

Partie 1 : durée 4 heures

Elle consiste en une expérimentation imposée sur un support technique donné. Le découpage temporel indicatif est le suivant :

- **Phase 1** - 1 h environ - Lecture du sujet, prédéterminations.
- **Phase 2** - À la suite de ce temps de préparation, le candidat présente et justifie oralement auprès des membres de la commission d'interrogation les méthodes et les moyens envisagés pour réaliser les essais demandés.
- **Phase 3** - Expérimentation, rédaction du compte-rendu des mesures. Remise de ce compte-rendu.

Repas en loge d'une durée de 1 heure

Partie 2 : durée 3 heures

Cette partie est la réalisation d'une séquence pédagogique à caractère expérimental, s'appuyant toujours sur le support proposé. Cette séquence devra avoir été validée par des mesures ou par des résultats expérimentaux que le candidat doit fournir.

- **Phase 4** – A partir de directives fixées par le jury, Proposition et développement de l'exploitation pédagogique, au niveau requis, et mesures associées. Au cours de cette phase, le candidat présente oralement aux membres de la commission d'interrogation sa proposition d'exploitation pédagogique avec les activités de mesures sur le support donné.
- **Phase 5** - Remise par le candidat d'un compte rendu écrit sur cette seconde partie.

A tout moment au cours de l'épreuve, les membres de la commission d'interrogation peuvent intervenir ; l'évaluation est permanente.

L'évaluation du candidat repose particulièrement sur les points suivants :

- L'analyse et l'exploitation des documents fournis,
- La configuration, la mise en œuvre et l'utilisation des matériels (en sécurité),
- L'exploitation des résultats de mesure,
- La pertinence des exploitations pédagogiques proposées,
- Le niveau de réflexion pédagogique (objectifs opérationnalisés),
- La qualité d'expression et de communication (écrite et orale).

B – DESCRIPTIF DES SUPPORTS PROPOSÉS EN 2006 :

Cette épreuve utilisait cinq supports :

- Un système projecteur de spectacle motorisé,
- Un système de pilotage de rétroviseurs de véhicule industriel,
- Une station de réception des images émises par les satellites météorologiques,
- Une station météorologique sans fil,
- Un serveur « Web » embarqué sur une carte électronique autonome.

Les systèmes servant de support au sujet sont dans les domaines « électronique, informatique, réseau et télécom ».

Projecteur de spectacle motorisé

Le support ***projecteur de spectacle motorisé***, permet d'illustrer la commande des moteurs dans les conditions particulières du spectacle notamment la nécessité d'obtenir un déplacement précis et fluide. Le candidat doit analyser cette commande spécifique de moteurs pas à pas. Une programmation partielle, en langage C, d'un microcontrôleur PIC est demandée au candidat.

Le jury a constaté que la partie programmation n'a pratiquement pas été abordée car les candidats découvrent souvent les commandes de moteurs pas à pas.

Un système de pilotage de rétroviseurs de véhicule industriel

Le système proposé permet de mettre en évidence la problématique de la commande multiplexée des organes d'un véhicule tel un autobus au travers d'un système de communication de terrain propre à l'industrie automobile. Le candidat est mis en situation d'analyser de compléter et de tester une application existante dans les mêmes conditions qu'un professionnel, en utilisant un atelier logiciel mettant en œuvre un langage graphique et des outils de simulation et de test adaptés.

Le jury constate que les candidats ne font pas une approche globale de la problématique du système et se noient très vite dans des détails. Dans la partie pédagogique on constate que les candidats ne font pas une réduction du système pour aborder une problématique accessible aux élèves. Les objectifs clairs d'apprentissage, les documents d'accompagnement, le descriptif de l'environnement dans lequel l'élève va travailler et les conditions d'évaluation sont très mal ou pas abordés

Station de réception d'images satellitaires

La ***station de réception d'images satellitaires*** est organisée autour de structures électroniques du domaine des télécommunications (SHF, VHF et BF). L'analyse expérimentale des grandeurs électriques utilise les techniques de mesures temporelles et surtout fréquentielles de signaux qui peuvent parfois dérouter les candidats. Une partie de la difficulté réside dans la prise en main de certains appareils (analyseur de spectre HF, générateur HF, oscilloscope numérique).

Dans la première partie, les candidats négligent parfois de faire une analyse approfondie des mesures demandées. Une mauvaise gestion du temps est également pénalisante.

La partie du système qui sert à l'exploitation pédagogique est laissée au choix du candidat. Ce choix doit être justifié et adapté au niveau cible, ***et doit se démarquer de l'exploitation de la première partie***. Le candidat doit présenter une séquence complète de manipulations et son corrigé.

Les points du référentiel abordés par les différentes séquences prévues doivent être mieux précisés ainsi que la durée (approximative) de ces séquences. On peut regretter un manque de plan rigoureux et une définition des objectifs assez floue.

Station météo sans fil

Pour le support **acquisition des données d'une station météo**, le travail demandé est organisé autour de l'acquisition et l'affichage d'informations transmises sur des trames.

Pour le domaine « électronique réseaux et informatique Industrielle » les connaissances et les activités sont liées à la configuration des réseaux, la programmation en langage C, la conception d'algorithmes simples et standards, l'utilisation de programmes basés sur des protocoles standard permettant d'accéder à des informations distantes.

Pour le domaine « Informatique, réseaux, et développement logiciel Objet », les connaissances et les activités sont liées à la configuration et la mise en œuvre des réseaux, la mise en œuvre de systèmes multitâches, l'utilisation de programmes permettant d'accéder à des informations distantes.

Remarques :

Les candidats butent sur des problèmes triviaux tel que :

- la configuration d'une adresse IP,
- l'expansion de signe sur la comparaison de caractères signés avec les constantes,
- la mise en œuvre *basique* de noyaux multitâches,
- l'utilisation des standards C,
- la construction d'algorithmes simples.

Serveur « web » embarqué

Le **serveur « web » embarqué** est un système destiné à visualiser à distance à l'aide de pages WEB, des données provenant de capteurs logiques ou analogiques ou de piloter des sorties logiques à l'aide de pages WEB. Ce dispositif est destiné à piloter ou surveiller des éléments de confort de la maison.

Le support d'étude est basé sur une carte électronique autonome comprenant des entrées sorties et sur un microcontrôleur de type PIC. Le serveur dispose d'une pile TCP/IP pour communiquer par le réseau local ou un modem.

Les principales difficultés rencontrées par les candidats sont dues à un manque de curiosité sur les technologies réseaux, une méconnaissance du modèle en couches, ou à un manque d'exploitation de la documentation fournie. Les candidats passent donc trop de temps à découvrir des notions élémentaires sur le test et la configuration d'un réseau local, qui devraient leur être familière.

La prise en main des outils d'analyse de trames ne pose pas de problèmes au candidat. Il est toutefois dommage qu'ils ne sachent pas l'exploiter dans la partie pédagogique.

C - CONSTATS GÉNÉRAUX SUR LA PREMIÈRE PARTIE : PRÉPARATION ET EXPÉRIMENTATION

Rappel : l'objectif de cette partie est d'évaluer les capacités des candidats à exploiter les documents techniques fournis afin de procéder à la mise en œuvre du système et d'en vérifier ses caractéristiques essentielles.

Dans l'épreuve de travaux pratiques, les candidats doivent éviter de longs développements théoriques et doivent plutôt se consacrer à l'aspect expérimental qui est un des objectifs principaux de cette épreuve.

De façon générale, il résulte de la mauvaise exploitation des documents, de sérieuses difficultés à analyser le traitement effectué sur des capteurs, à interpréter les mesures demandées ou à configurer le dispositif.

Le jury a pu constater un manque de rigueur dans l'élaboration d'une méthodologie d'analyse du système et dans l'interprétation des relevés. Ce dernier aspect n'a été - la plupart du temps - que partiellement traité.

Le volume et la qualité des questions traitées est souvent insuffisant au regard du temps consacré, d'autant plus que le découpage en deux parties bien distinctes, met une limite temporelle précise à cette activité.

Remarques particulières :

- Le jury constate trop souvent des difficultés de mise en œuvre des moyens « classiques » de mesures ;
- L'oscilloscope est souvent mal utilisé et sous exploité par de nombreux candidats. Peu de candidats utilisent pleinement les possibilités de mesures sur les signaux, offertes par ces instruments (amplitude, durées, fréquences, etc.) ;
- Certains candidats transposent mal, voire pas du tout, leurs connaissances théoriques au plan expérimental ;
- Les comptes-rendus de mesures sont souvent lacunaires au niveau des protocoles expérimentaux et des modes opératoires. L'analyse des résultats de mesures est souvent superficielle.

D - COMMENTAIRES SUR LA SECONDE PARTIE DE L'ÉPREUVE

Elle est parfois mal structurée en raison d'une difficulté à définir l'objectif de la séquence expérimentale et de la situer dans un cycle de progression.

La plupart des candidats a des difficultés à se projeter dans des situations réelles de didactisation. Il en résulte que, **souvent ils restent au niveau des intentions** et des propositions de séquence pédagogiques vagues. **Cette partie doit être étayée par des manipulations et des mesures.**

Il est conseillé aux candidats de proposer des séquences pédagogiques réalistes tenant compte des connaissances des étudiants en respectant une progression pédagogique.

E – CONCLUSIONS

En conclusion, Il est conseillé aux candidats de :

- Prendre connaissance des référentiels des différents diplômes (en particulier BTS et DUT),
- Apprendre à gérer correctement le temps imparti,
- **Lire complètement** et de manière pertinente les dossiers de présentation et des questions,
- Élargir leur culture scientifique de façon à ne pas être dérouter par des problèmes aux marges de la discipline et suivre de près l'évolution des technologies et des fonctions de l'électronique
- Renforcer les connaissances des fonctions de base de l'électronique (amplification, filtrage, modulateurs, démodulateurs, systèmes bouclés, oscillateurs, capteurs, etc.), des technologies de réseaux et de liaisons numériques (Ethernet, TCP/IP, CAN, RS485 ...) et de l'informatique industrielle (communications, réseaux, méthodes, outils, etc.) en adéquation avec les nouveaux référentiels BTS/DUT.
- Connaître les techniques de mise en œuvre des circuits programmables ou configurables (microcontrôleurs, FPGA, CPLD, etc.), ainsi que les langages associés au développement d'applications (C, VHDL, éventuellement C++),
- Savoir proposer les méthodes de mesure adaptées aux problèmes posés,
- D'acquérir des connaissances sur les moteurs pas à pas et leur mise en œuvre,
- De se familiariser avec les appareils de mesures récents et/ou peu courants (analyseur de spectre, générateur HF...).