

## CORRIGÉ

### Sommaire

<b>A</b>	<b>Étude générale – Énergie – Économie du projet</b>	<b>2</b>
A.1	Aspect énergétique	2
A.2	Aspect financier	2
A.3	Contexte de la cogénération	6
<b>B</b>	<b>Distribution et protection électrique</b>	<b>7</b>
B.1	Généralités	7
B.2	Transformateur	7
B.3	Calcul de la protection C 13-100 contre les défauts polyphasés	10
B.4	Mise en œuvre de la protection C13-100	12
<b>C</b>	<b>Analyse thermique de la liaison d'énergie du producteur</b>	<b>17</b>
C.1	Câble : technologie	17
C.2	Loi fondamentale : équation de la chaleur.	17
C.3	Conduction thermique appliquée au câble	18
C.4	Conduction et convection thermiques appliquées au câble	19
C.5	Intensité admissible dans le câble en conditions réelles. Calcul avec le guide UTE C13-205.	21
<b>D</b>	<b>Filtre passif et actif pour bouchonnage 175-188 Hz des autoproducteurs</b>	<b>22</b>
D.1	Problématique	22
D.2	Circuit bouchon passif	24
D.3	Filtre actif série (FAS)	27

## A ÉTUDE GENERALE – ÉNERGIE – ÉCONOMIE DU PROJET

### A.1 Aspect énergétique

#### A.1.1 Puissances totales électrique, thermique et gaz. Rendements électrique, thermique et global.

	P gaz (kW)	P électrique (kW)	P thermique (kW)
groupe JMS620	6621	2734	2819
groupe JMS620	6621	2734	2819
groupe JMS616	4817	1946	2100
<b>Total</b>	<b>18 059</b>	<b>7 414</b>	<b>7 738</b>

$$\eta \text{ électrique} = P \text{ élec} / P \text{ gaz} = 41,1\% \quad \eta \text{ thermique} = P \text{ th} / P \text{ gaz} = 42,8\%$$

$$\eta \text{ global} = (P \text{ élec} + P \text{ th}) / P \text{ gaz} = 83,9\%$$

#### A.1.2 Commentaires + pertes.

Rendement électrique élevé car l'objectif est la vente d'électricité.

Pertes : 2907 kW dans les moteurs à combustion et les gaz d'échappement (tout n'est pas récupéré) + pertes alternateurs (67+67+54 = 188 kW pour les alternateurs).

Nota : pertes par rayonnement des 3 moteurs : 777 kW.

#### A.1.3 Énergies et Ree. Energie thermique non utilisée pendant 1600 heures ?

Energie électrique :  $W_e = P \cdot t = 26.640.000 \text{ kWh} = 26,64 \text{ GWh}$ .

Energie thermique :  $W_{th} = P \cdot t = 15.400.00 \text{ kWh} = 15,4 \text{ GWh}$ .

$$W_{th} / W_e = 0,58 > 0,5$$

$$Ree = \frac{26,64}{55 - \frac{15,4}{0,9}} = 70,3 \%$$

L'énergie thermique non utilisée pendant 1600 heures est dissipée dans l'atmosphère, directement pour les gaz d'échappement, et via des aérothermes pour les circuits de refroidissement des moteurs.

#### A.1.4 Récupération d'énergie thermique Pth-éch1, Pth-éch2 et puissance totale.

$$W = m c \Delta\theta = P \Delta t \Rightarrow P = (m / \Delta t) c \Delta\theta = \text{débit massique} \cdot c \cdot \Delta\theta$$

$$P_{th-éch1} = (68.10^3/3600) \times 0,9653 \times 4205 \times (86,6 - 70) = 1272,7 \text{ kW}$$

$$P_{th-éch2} = (68.10^3/3600) \times 0,9653 \times 4205 \times (105 - 86,1) = 1449 \text{ kW}$$

$$P_{totale \text{ récupérée}} = 1273 + 1449 = 2722 \text{ kW}$$

Sur la centrale avec les 3 moteurs à gaz  $P_{th} \cong 7,5 \text{ MW}$ .

### A.2 Aspect financier

#### A.2.1 Recettes Électriques

##### A.2.1.1 Puissance électrique garantie PG

Pour 1 groupe JMS620 : Pélec revenue =  $(2722 - 42) \times 98,5/100 = 2640$  kW

Pour 1 groupe JMS616 : Pélec revenue =  $(1937 - 32) \times 98,5/100 = 1876$  kW

Pour la centrale avec 2 groupe JMS620 et 1 groupe JMS616

$$PG = 2 \times 2640 + 1876 = 7156 \text{ kW}$$

#### A.2.1.2 Energie électrique We

$$We = PG \times \text{durée hiver} \times \text{disponibilité} = 7156 \times 3624 \times (95/100) \Rightarrow We = 24.636.677 \text{ kWh}$$

Rémunération.

#### A.2.1.3 Principe de rémunération de l'électricité.

Principe : sur la puissance et l'énergie.

❶ Part fixe (liée à la puissance garantie PG) + part proportionnelle à l'énergie active fournie +rémunération complémentaire.

❷ Prix de l'énergie électrique sur la base du prix du gaz. Mais prix plafonné.

#### A.2.1.4 Montant de la rémunération.

Données : PG = 7156kW Energie = 24 636 677 kWh. Coefficient d'indexation K = 1,0796.

Prime fixe Taux de Base de la Prime Fixe (**TBPF**)

$$TBPF = PFa + PFe + PFr$$

Parts fixes indexées

$$PFa = 85\text{€} / \text{kW} \times K = 91,76 = 91,77 \text{ €} / \text{kW}$$

$$PFe = 20,6\text{€} / \text{kW} \times K = 22,24 \text{ €} / \text{kW}$$

$$PFr = (220 - 5 \times (0,001 PG - 5)) / 6,56 \times K = 31,89 \times K = 34,43 \text{ €} / \text{kW}$$

**TBPF indexé = 148,44 €/kW de PG**

Part proportionnelle. PP

$$PP = P \text{ gaz saisonalisé} / \eta_{PCI} + PPe + PPr$$

$$Pgaz / \eta_{PCI} = 2 / 0,51 = 3,92 \text{ c€} / \text{kWh}$$

Parts proportionnelles indexées

$$PPe = 0,305 \times K = 0,33 \text{ c€} / \text{kWh}$$

$$PPr = (1,5 - 0,043 \times (0,001 PG - 5)) / 6,56 \times K = 0,23\text{c€} / \text{kWh}$$

**P P indexée = 4,48 c€/kWh**

Rémunération complémentaire : RC

$$Ree = E / (Q - C/0,9) = 69,67\%$$

$$RC \text{ indexée} = 0,3 \times K = 0,32 \text{ c€} / \text{kWh}$$

Rémunération :

$$\text{Prime Fixe} = PG \times TBPF = 7156 \times 148,44 = 1.062.236 \text{ €}$$

Prix Proportionnel à énergie active :

$$PP \times \text{Energie active} = 4,48/100 \text{ €} / \text{kWh} \times 24.636.677 = 1.103.723 \text{ €}$$

$$\text{Rémunération complémentaire} : 0,32/100 \times 24.636.677 = 78.837 \text{ €}$$

**Recette totale = 2.244.796 €  $\cong$  14,7 MF**

unités €/kW	PFa 91,77	PFe 22,24	PFr 34,43	TBPF (€/kW) 148,44
c€/kWh	Pgaz / ηPCI 3,92	PPe 0,33	PPr 0,23	PP (c€/kWh) 4,48
M€	P fixe 1,06	Rémunération proportionnelle 1,1	Rémunération complémentaire 0,079	Rémunération totale (M€) 2,24

#### A.2.1.5 Coût d'achat. Comparaison.

Prix moyen du kWh : 9,1 c€ pour la centrale étudiée.

Pour EDF, sur le plan national, le coût de rachat du kWh de cogénération est de 6,86 c€, alors que celui produit par le nucléaire est de 2,28 c€/kWh. (F.Roussely. Pdt d'EDF. Le Monde du 10/01/2002).

Prix à la bourse de l'électricité (Powernext) : 1 à 1,8 c€/kWh le 21/06/02 et 1,6 à 3,4 c€/kWh le 21/01/02.

Prix de vente au particulier (tarif bleu option tempo) : 3 à 8 c€/kWh HT (jour bleu ou blanc) et 12 à 34 c€/kWh HT (jour rouge) sans l'abonnement.

#### A.2.1.6 Commentaires.

La part fixe est égale à la part proportionnelle à l'énergie électrique => rémunération de la puissance P autant que de l'énergie We.

Importance de la rémunération complémentaire => peut être augmentée en améliorant la disponibilité (de 95% à 98%), mais plafonnée à  $91k€ \times K = 98,7 k€$ .

Le prix de l'électricité est indexé sur le prix du gaz mais plafonné à une valeur.

La part fixe est très sensible à la disponibilité de l'installation.

### A.2.2 Analyse financière

A.2.2.1 Tableau de compte prévisionnel et temps de retour.

A.2.2.2 Tableau de compte prévisionnel et temps de retour.

A.2.2.3 Tableau de compte prévisionnel et temps de retour.

Scénario 1. Pas d'emprunt													
année	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Recettes		3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Dépenses 1		1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
Dépenses 2		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Annuité													
Investissement	4,5												
Total dépenses	4,5	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Résultat	-4,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Résultat cumulé	-4,5	-3,5	-2,5	-1,5	-0,5	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5
temps de retour : 4,5 ans						TRI		19,6% (Taux de Rentabilité Interne)					

Scénario2 . Emprunt 2 M€ - 7% - 6 ans													
année	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Recettes		3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Dépenses 1		1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
Dépenses 2		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Annuité		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4						
Investissement	4,5												
Total dépenses	2,5	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2	2	2	2	2	2
Résultat	-2,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	1	1	1	1	1	1
Résultat cumulé	-2,5	-1,9	-1,3	-0,7	-0,1	0,5	1,1	2,1	3,1	4,1	5,1	6,1	7,1
temps de retour : 4 ans						TRI		25,5%					

Scénario 3. Emprunt 2 M€ - 7% - 6 ans . Gaz : +0,3 c€													
année	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Recettes		3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Dépenses 1		1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
Dépenses 2		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Annuité		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4						
Investissement	4,5												
Total dépenses	2,5	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
Résultat	-2,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Résultat cumulé	-2,5	-2,1	-1,7	-1,3	-0,9	-0,5	-0,1	0,7	1,5	2,3	3,1	3,9	4,7
temps de retour : 6 ans						TRI		17,5%					

#### A.2.2.4 Synthèse.

- Variation des résultats aux différents scénarios ou hypothèses.
- Influence de l'emprunt.
- influence du prix du gaz. Que sera-t-il dans 2 ans, 5 ans....?

En terme de performances, ce n'est pas tellement le temps de retour qui compte, mais le taux de rentabilité interne (TRI) du capital investi – ou taux de rémunération du capital investi - qui a été calculé : 19,6 ; 25,5 et 17,5 %. En dessous de 12 à 15 %, les financiers n'investissent pas.

Nota : dans l'éolien, certains établissements financiers( Théolia) annoncent des TRI de 23% sur les 15 prochaines années sur la base de 2800 heures de fonctionnement par an.

### A.3 Contexte de la cogénération

#### A.3.1 Secteurs d'activité.

Industrie : sucrerie, chimie, papeterie qui sont des secteurs gros consommateur d'électricité et de chaleur. Exemples en chimie : Pechiney pour la production d'alumine (Gardanne-13): 88 MWélec, 180 tonne de vapeur / heure. Peugeot (Mulhouse-68) 18 MWélec, 16 MWth.

Tertiaire : habitat, commerce, santé. Exemples : chaufferies et réseaux de chaleur à Rennes (usine d'incinération d'ordures ménagères), Bourges (4500 logements, 8MWélec; 10 MWth), Grenoble, Montpellier (centre commercial, hôpital), Marseille (hôpital; 4MWélec).

En projet 800 MWélec, à Dunkerque chez ARCELOR, production à partir de gaz naturel et de gaz sidérurgiques.

#### A.3.2 Ordre de grandeur de la puissance électrique. Impact.

Entre 4000 et 5000 MW (4345 MW en janvier 2002), soit l'équivalent de 4 à 5 tranches nucléaires. Impact : environ 4% de la puissance totale installée à EDF; et 3 à 5% de l'énergie consommée.

#### A.3.3 Modification en terme de production.

Arrivée de production décentralisée dans une situation de production centralisée. Idem avec les éoliennes.

Conséquences sur les réseaux électriques (congestion, dimensionnement et protection).

#### A.3.4 Autres intervenants.

Le bénéficiaire de l'installation + assurances +banques ou investisseurs (unifergie du crédit agricole, Théolia pour l'éolien)

#### A.3.5 Installateurs et exploitants.

Installateurs : CEGELEC, SPIE, FORCLUM, JAVEL, SNEF....

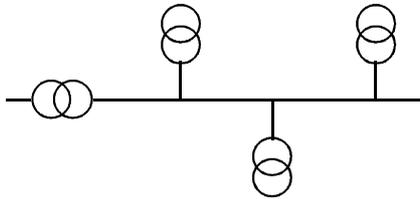
Exploitants : DALKIA (Vivendi et EDF) et ELYO (Suez) dans les services énergétiques.

## B DISTRIBUTION ET PROTECTION ELECTRIQUE

### B.1 Généralités

#### B.1.1 Structures de réseaux.

Schéma en antenne ou simple dérivation ou radial



Double dérivation

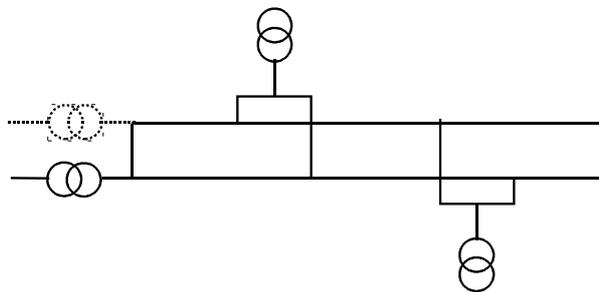
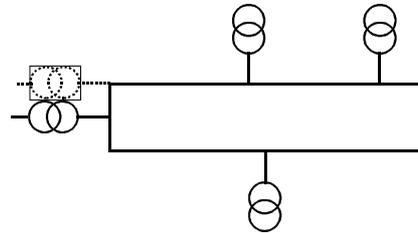


Schéma en boucle (fermée) ou coupure d'artère si des appareils permettent l'ouverture de la boucle



#### B.1.2 Textes.

Norme NF C 15-100 : installations électriques à basse tension.

Norme NF C 13-100 : postes de livraison alimentés par un réseau de distribution publique HTA.

Décret du 14/11/1988 : protection des travailleurs dans les établissements qui mettent en oeuvre des courants électriques (JO du 24/11/1988).

B.1.3 Terme HTA : haute tension niveau A comprise entre 1kV et 50 kV en courant alternatif.

## B.2 Transformateur

### B.2.1 Technologie

#### B.2.1.1 10 mots-clés de mise en œuvre d'un transformateur.

Transport, installation ou pose, raccordement, remplissage d'huile, isolement, refroidissement, protection interne, protection de l'environnement (bruit, incendie, pollution), réglage, couplage, liaison du neutre, liaison des masses ou de la cuve à la terre.

#### B.2.1.2 ODAF : Oil (huile) Dirigée - Air forcée.

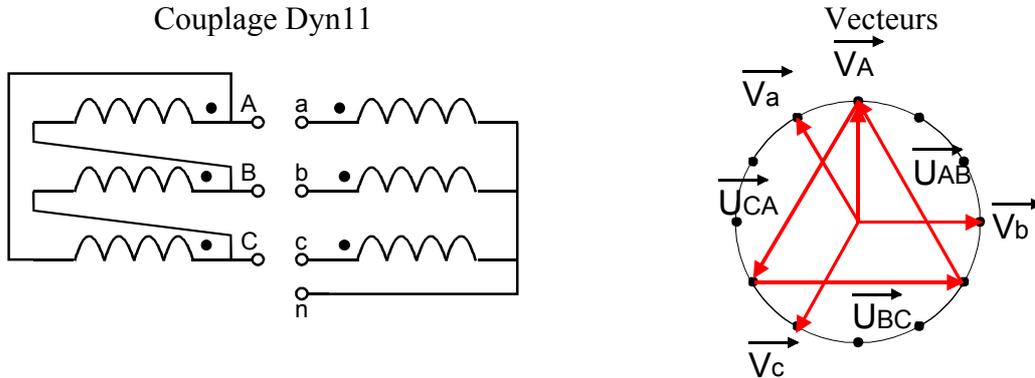
#### B.2.1.3 Matériaux constitutifs du transformateur ?

Circuit magnétique : fer silicium (3 à 5%) à grains orientés. Conducteurs : cuivre.

Isolants : - sur les conducteurs : isolant textile (coton, nylon...) ou naturel (papier) ou tissu de verre + résine polymérisée,  
- de l'ensemble : huile minérale.

B.2.1.4 Couplage Dyn11. Connexions

B.2.1.5 Diagramme vectoriel des tensions.



B.2.1.6 Mise en parallèle de transformateurs.

Même rapport de transformation. Même ordre de succession des phases. Même indice horaire. Même tension de court-circuit  $U_{cc}$ .

B.2.1.7 Composant et son rôle.

Photo d'un parasurtenseur pour limiter les surtensions lors des transitoires de défaut. Disposé entre neutre et terre. Symbole :

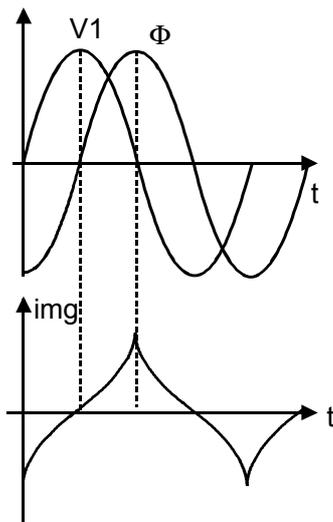


**B.2.2 Modélisation**

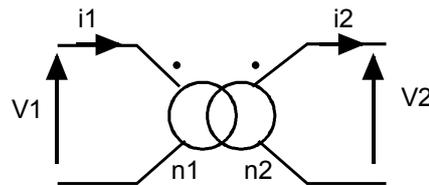
B.2.2.1  $v_1(t)$ ,  $\Phi(t)$  et  $i_{mg}(t)$ .

B.2.2.2 Schéma équivalent du transformateur idéal, relations et conventions correspondantes.

B.2.2.1 Pertes fer = 0



B.2.2.2 Schéma

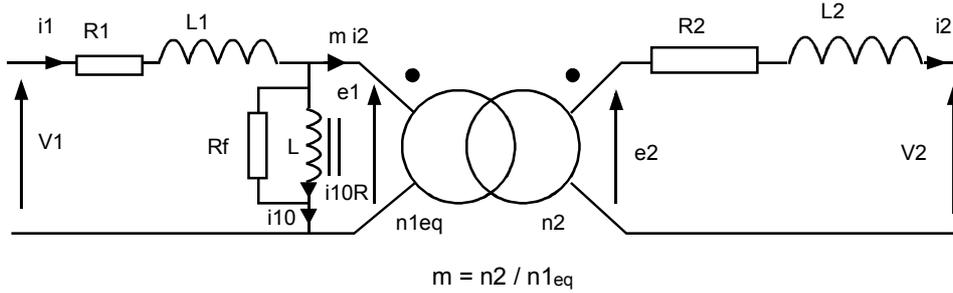


Conventions : primaire en récepteur, secondaire en générateur. Le point • indique les bornes de polarités identiques et fixe le signe des A.tr.

Relations avec le modèle du transformateur sans perte :

$$v_2/v_1 = n_2/n_1 \text{ et } n_1 i_1 - n_2 i_2 = 0 \text{ ou } i_1 / i_2 = n_2/n_1$$

B.2.2.3 Schéma électrique équivalent avec les tensions simples du transformateur réel.



$$e_1 = n_1 / \sqrt{3} \, d\Phi_c / dt = n_{1eq} \, d\Phi_c / dt \quad \text{et} \quad e_2 = n_2 \, d\Phi_c / dt \quad e_2 = m \cdot e_1 .$$

$$n_{1eq} \, i_1 - n_2 \, i_2 = n_{1eq} \, i_{10R} \quad \Phi_c : \text{flux commun}$$

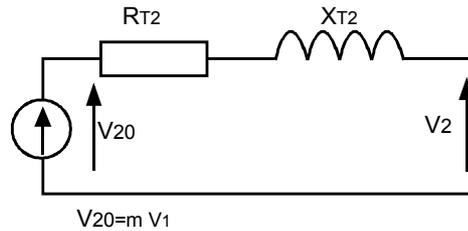
- $R_1, R_2$  : résistances des enroulements primaire et secondaire par phase,
- $l_1, l_2$  : inductances de fuite des enroulements primaire et secondaire par phase,
- $L_m$  : inductance magnétisante saturable,
- $R_f$  : pertes fer,
- $I_{10}$  ou  $I_m$  : courant magnétisant,
- $e_1, e_2$  : tensions induites par la variation de flux.

B.2.2.4 Schéma équivalent au secondaire

Hypothèses de Kapp :  $R_f$  et  $L$  aux bornes de  $V_1$ . Flux  $\Phi_c$  forcé par la tension  $V_1$ .

Rapport de transformation :  $m = V_{20} / V_1$ . Ou pour éviter toute confusion  $m = V_{a0} / V_A = U_{ab0} / U_{AB}$ . Rapport des valeurs eff. des tensions secondaires et primaire à vide; fonction du nombre de spires et du couplage. Qualifié de rapport externe ou apparent par certains auteurs.

$$m = 21 \, \text{kV} / 63 \, \text{kV} = 1/3.$$



Calcul des éléments.

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{cc}\% = 100 \frac{V_{2cc}}{V_2} = 100 \frac{V_{1cc}}{V_1} \\ V_{2cc} = Z_{T2} \cdot I_{cc} \quad \text{avec} \quad I_{cc} = I_{2n} \end{array} \right\} \Rightarrow Z_{T2} = \frac{V_{2cc}}{I_{2n}} \Rightarrow Z_{T2} = \frac{u_{cc}\%}{100} \times \frac{V_{20n}}{I_{2n}} \times \frac{3V_{20n}}{3V_{20n}} = \frac{u_{cc}\%}{100} \times \frac{U_{20n}^2}{S_n}$$

$$Z_{T2} = 17/100 \times 21^2 / 36 = 2,08\Omega$$

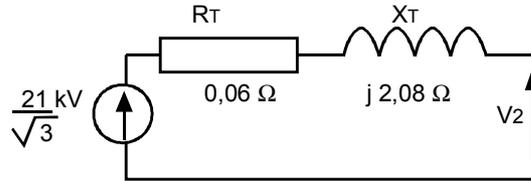
$R_{T2}$  . Pertes dues à la charge :  $P_j = 3 R_{T2} I_{2n}^2$

$$\Rightarrow R_{T2} = \frac{P_j}{3 I_{2n}^2} = \frac{P_j}{3} \times \left( \frac{3V_{20}}{S_n} \right)^2 = \frac{180 \cdot 10^3}{3} \times \left( \frac{\sqrt{3} \cdot 21 \cdot 10^3}{36 \cdot 10^6} \right)^2 = 61,2 \text{m}\Omega$$

$$X_{T2} = \sqrt{Z_{T2}^2 - R_{T2}^2} = 2,079\Omega \approx 2,08\Omega$$

$$X_{T2} \gg R_{T2} . \text{ relation pratique : } X_{T2} = \frac{u_{cc}\%}{100} \times \frac{U_{20n}^2}{S_n}$$

Schéma équivalent :



### B.3 Calcul de la protection C 13-100 contre les défauts polyphasés

#### B.3.1 Courant de court-circuit biphasé Iccbi

##### B.3.1.1 Impédances

Réseau 63kV :

En module  $Z_{ccHTB} \max \approx X_{ccHTB} \max = 3 V_{HTB}^2 / P_{ccmin} = U_{HTB}^2 / P_{ccmin}$

$$X_{ccHTB} \max = 63^2 / 1132 = 3,5 \Omega$$

$$X_{ccHTA} \max = m^2 X_{ccHTB} \max = (21/63)^2 \times 3,5 = 0,39 \Omega$$

$$\underline{Z}_{ccHTA} \max = j 0,39 \Omega$$

Transformateur 63/21kV :

En module  $Z_{TR.HTA} = U_{cc\%} \cdot U_{HTA}^2 / S_n = 17/100 \cdot 21^2 / 36 = 2,08 \Omega$

$$\underline{Z}_{TR.HTA} = j 2,08 \Omega$$

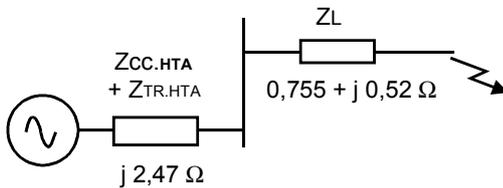
Liaison par câbles :

1km - 240mm<sup>2</sup> alu :  $\underline{Z}_{L1} = 0,125 + j 0,13$

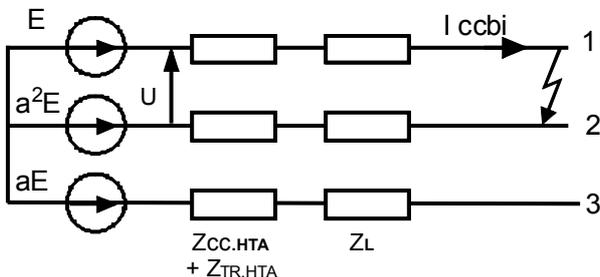
3km - 240mm<sup>2</sup> alu :  $\underline{Z}_{L2} = 3 (0,21 + j 0,13) = 0,63 + j 0,39$

$$\underline{Z}_L = 0,755 + j 0,52 \Omega$$

Schéma unifilaire



##### B.3.1.2 Calcul de Iccbi .



$$\underline{I}_{ccbi} = \frac{\underline{U}}{2 (\underline{Z}_{TR.HTA} + \underline{Z}_{cc.HTA} + \underline{Z}_L)}$$

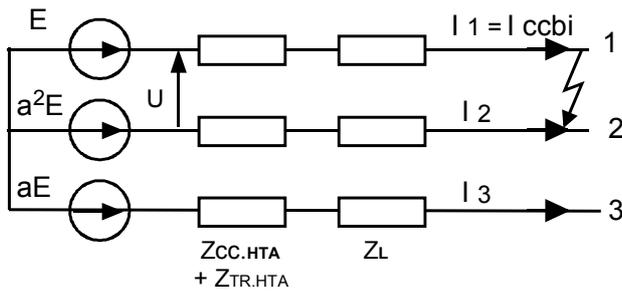
$$\underline{I}_{ccbi} = \frac{\underline{U}}{2 \underline{Z}_{total}}$$

$$|\underline{U}| = \sqrt{3}E$$

Application numérique :  $Z_{total} = j2,47 + 0,755 + j0,52 = 0,755 + j2,99 \Omega$  et  $U = 21 \text{ kV}$

$$I_{ccbi} = (21)^2 / 2 \cdot (0,755^2 + 2,99^2)^{1/2} = 3405 \text{ A}$$

B.3.1.3 Calcul de Id et Ii.



Equation du défaut :  
 $V_1 = V_2$  ;  $I_1 = -I_2$  et  $I_3 = 0$

Composantes symétriques :

$$\begin{cases} I_0 = \frac{1}{3}(I_1 + I_2 + I_3) = 0 \\ I_d = \frac{1}{3}(I_1 + aI_2 + a^2I_3) = \frac{I_1}{3}(1 - a) \\ I_i = \frac{1}{3}(I_1 + a^2I_2 + aI_3) = \frac{I_1}{3}(1 - a^2) \end{cases}$$

Pas de courant homopolaire qui est caractéristique d'un défaut à la terre.

$$I_3 = 0 = I_0 + aI_d + a^2I_i \Rightarrow \underline{I_d = -aI_i} \text{ ou } \underline{I_i = -a^2I_d} \quad |I_d| = |I_i|$$

$I_d = I_1(1 - a)/3$ . Si on pose  $I_{ccbi} = I_1 (= -I_2)$ ,  
 alors  $\underline{I_d = I_{ccbi}(1 - a)/3}$  et  $\underline{I_i = I_{ccbi}(1 - a^2)/3}$

Application numérique :  $I_{ccbi} = 3405A$  ;  $|1 - a| = \left| \frac{3}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right| = \sqrt{3} = |1 - a^2|$

$$I_d = I_{ccbi} / \sqrt{3} = I_i = \underline{1965A}$$

B.3.2 Calcul de IM et IB.

IM : courant injecté en HTA par l'installation de production.

Puissance apparente totale :  $S_{total} = \sqrt{3} U I_M = 2 \times 2,934 + 1 \times 2,087 = 7,955MVA$

$\Rightarrow \mathbf{I_M = 230A}$  avec  $U = 20kV$

$\mathbf{I_B = 0}$  car les transformateurs sont mis sous tension par les alternateurs de la centrale.

B.3.3 Icctri G = 1020A à 100ms.

Le courant initial injecté est le courant en régime subtransitoire dans lequel les amortisseurs et l'inducteur ont un effet.

Grandeurs qui interviennent :

- X''d, X'd, Xd : réactances subtransitoire, transitoire, synchrone directe ou longitudinale.
- T''d, T'd, Ta : constante de temps subtransitoire, transitoire directe, et celle de l'induit.
- Instant du court-circuit ou déphasage de la tension.

B.3.4 Temps de 100 ms.

Pour tenir compte du temps de réponse de la fonction de protection = relais de protection (50ms mini) + ouverture du disjoncteur ( $\approx 150ms$ ) (chiffre essais EDF sur le matériel implanté).

## B.4 Mise en œuvre de la protection C13-100

### B.4.1 Conditions de réglage

Conditions	Justifications
❶ Iréglage < $I_{c\text{cbi mini}}$	Déclenchement sur le plus petit courant de court-circuit.
❷ Iréglage > 5 à 8 $I_B$	Eviter les déclenchements intempestifs à la mise sous tension des charges (courant d'appel).
❸ Iréglage > $I_M$	Ne pas déclencher sur l'intensité du courant délivré par le producteur.
❹ Iréglage > $I_{c\text{ctri G}}$	Ne pas déclencher sur un défaut sur le réseau HTA.

### B.4.2 Condition essentielle de sécurité.

❶. Couper en cas de défaut dans la centrale.

L'objectif général (cf. sujet) est d'éviter les déclenchements intempestifs du producteur et d'assurer la sélectivité.

### B.4.3 Réglage – Sélectivité

#### B.4.3.1 Réglage.

Guide UTE C 13-100 : Iréglage = min (0,8  $I_{c\text{cbi}}$ ; 8  $I_B$ ) et temps d'élimination < 0,2s.

$I_{c\text{cbi}} = 3405 \text{ A}$  et  $I_B = 0$  calculés en B212 et B22.

En reprenant le tableau du B.4.1.

1 Iréglage  $\leq 0,8 I_{c\text{cbi mini}} = 2723 \text{ A}$  - temporisation  $\leq 0,2 \text{ s}$

2 Iréglage  $\geq 8 I_B = 0$

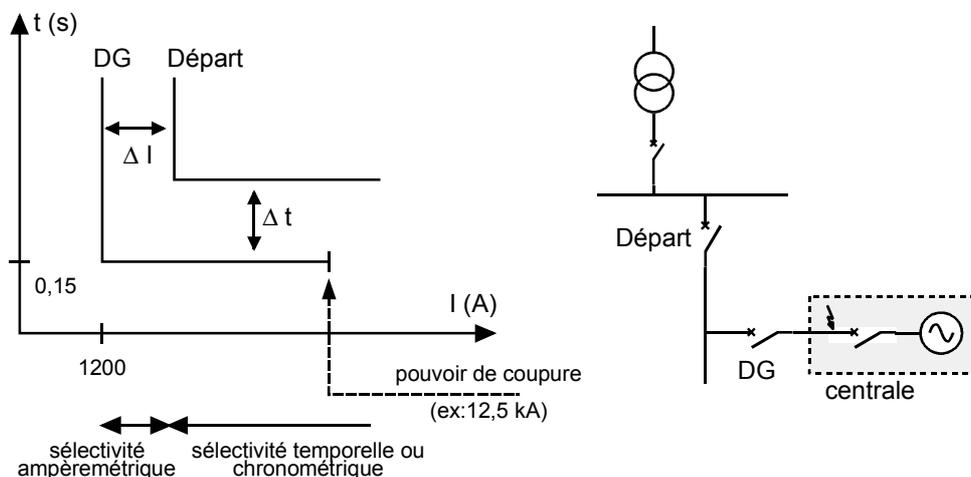
3 Iréglage  $\geq I_M = 230 \text{ A}$

4 Iréglage  $\geq I_{c\text{ctri G}} = 1020 \text{ A}$

Max [0 ; 230A ; 1020A]  $\leq$  Iréglage  $\leq 2723\text{A}$  + temporisation  $\leq 0,2\text{s}$

En pratique  $1,2 I_{c\text{ctriG}} = 1224\text{A} \leq$  Iréglage  $\leq 0,8 I_{c\text{cbi}} = 2723\text{A}$  + temporisation 0,15s

#### B.4.3.2 Courbes de déclenchement.



**B.4.3.3 Sélectivité : domaines – intervalles.**

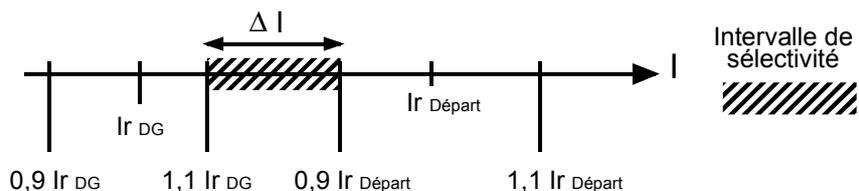
Domaines : c.f. courbes précédentes avec  $\Delta I$  et  $\Delta t$ . Globalement il s'agit d'une sélectivité par le temps et par le courant.

Intervalles de sélectivité :

$\Delta t$  lié aux éléments de la chaîne de protection : temps de réponse des capteurs, du relais, précision des temporisations, temps de coupure du disjoncteur.

$\Delta t = 0,2$  à  $0,3$  s en pratique. Valeur à rapprocher du temps d'élimination du défaut (0,2s) fixé par la norme C 13-100.

$\Delta I$ . Iréglage Départ  $\geq$  Iréglage DG en tenant compte de la précision (+/-10%) des mesures de courants.



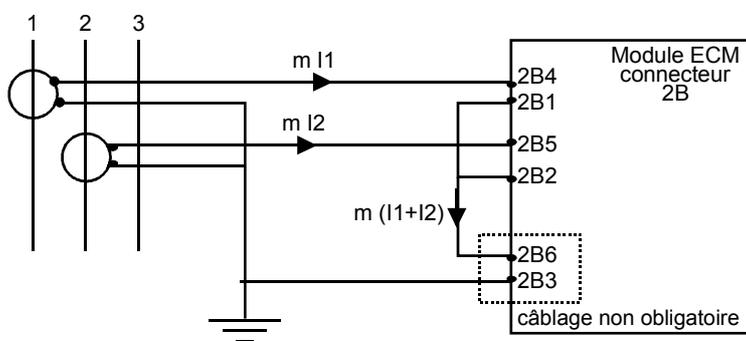
$\Delta I > 0 \Rightarrow 0,9 I_r \text{ Départ} > 1,1 I_r \text{ DG} \Rightarrow I_r \text{ Départ} > 1,22 I_r \text{ DG}$  soit  $1,22 \times 1200 = 1467\text{A}$  .

**B.4.3.4 Réglages du disjoncteur Départ.**

En final :  $I_r \text{ départ} = 1467 \text{ A}$  et temporisation 0,5s. Justification en B.4.3.3.

**B.4.4 Raccordement des capteurs de courant et entrées au relais de protection**

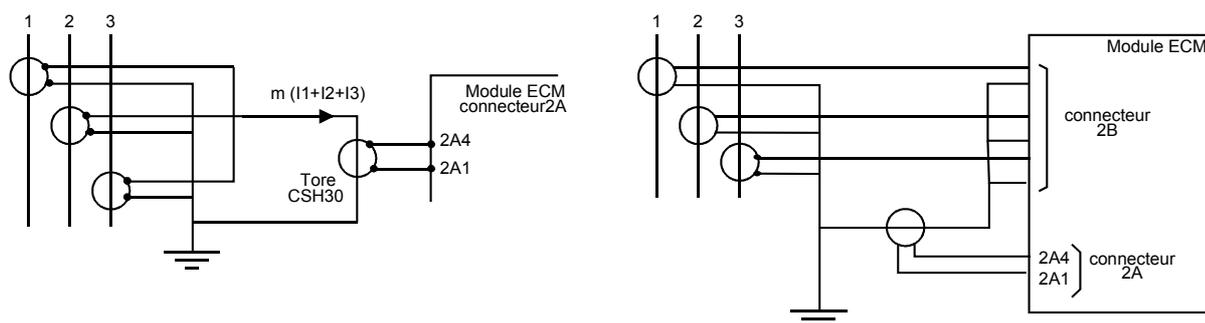
**B.4.4.1 Schéma de câblage du raccordement des TC. Défauts entre phases.**



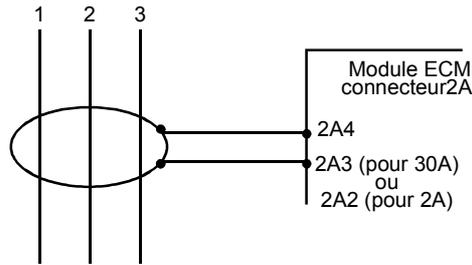
Pour les défauts bi ou triphasés sans contact à la terre,  $I_3$  se déduit de  $I_1$  et  $I_2$ .  $I_3 = -(I_1 + I_2)$

**B.4.4.2 2 schémas de câblage. Avantages et inconvénients. Défauts à la terre .**

Solution 1 Schéma indiqué par le constructeur (à droite).



Solution 2. Emploi d'un tore.



Solution 1 :

Avantage : économique par l'emploi des TC de la détection des défauts polyphasés.

Inconvénients : - sensibilité (typique > 12 % des In des TC),

- mise en place des TC pas toujours possible ou aisée.

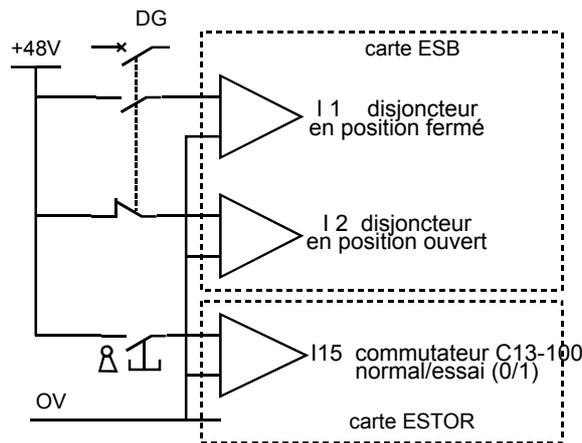
Solution 2 :

Avantages : - sensibilité (typique de l'ordre de 1A),

- montage avec tore ouvrant.

Inconvénient : coût.

#### B.4.4.3 Raccordement des entrées du relais de protection.



### B.4.5 Disjoncteur DG : commande

#### B.4.5.1 Schéma de commande de fermeture du disjoncteur.

Enclenchement : par bobine à mise sous tension ou logique positive.

On peut coupler en manuel la centrale et non les groupes, à condition que les disjoncteurs des groupes électrogènes soient ouverts.

$$YF = API1 + O2 + (CM \cdot \overline{DCGE1} \cdot \overline{DCGE2} \cdot \overline{DCGE3})$$

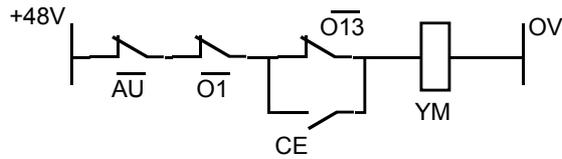


#### B.4.5.2 Schéma de commande d'ouverture du disjoncteur.

Déclenchement : par bobine à manque de tension ou logique négative.

En logique positive on a  $YM = AU + O1 + (O13 \cdot \overline{CE})$  .

Ce qui donne en logique négative :  $YM = \overline{AU} \cdot \overline{O1} \cdot (\overline{O13} + CE)$



**B.4.5.3 Cellule : définition, dimensions et masse.**

Définition (CEI 298) : appareillage sous enveloppe métallique compartimentée .

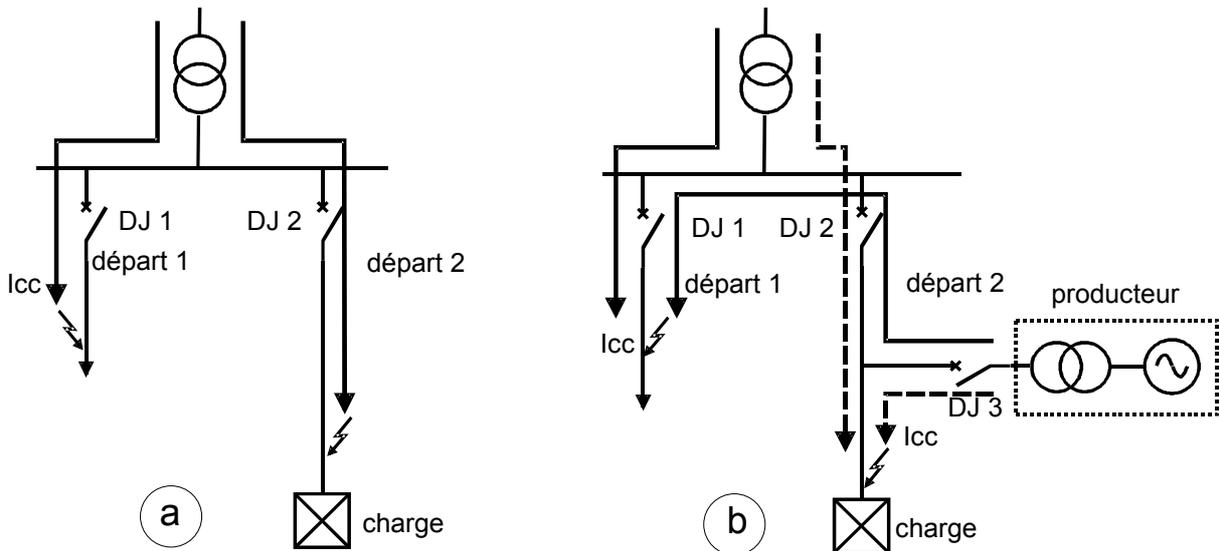
Dimension : ordre de grandeur : < 2m / < 1m / < 2 m en hauteur/largeur / profondeur.

Masse ≈ qqs 100kg.

Pour la cellule disjoncteur avec double sectionnement DM2 ( protection par disjoncteur DG étudié) installée dans la centrale : 1,6 x 0,75 x 1,2m et 400kg. Coût de 15 à 18000 Euros avec le relais de protection.

**B.4.6 Modification apportée par une production décentralisée.**

**B.4.6.1 Trajet des courants de courts-circuits.**



**B.4.6.2 Etats - actif / inactif - des disjoncteurs 1 et 2..**

Lieu du défaut	État DJ1	État DJ2
départ 1	Actif	Inactif
départ 2	Inactif	Actif
Schéma a		

Lieu du défaut	État DJ1	État DJ2
départ 1	Actif	Actif
départ 2	Inactif	Actif
Schéma b		

**B.4.6.3 Modifications et risques.**

Défaut sur départ 1 :

- modification : contribution du producteur au courant de court-circuit via le départ 2 et le disjoncteur D2.

- risque : ouverture de D2 pour un défaut ne le concernant pas. Coupure de l'alimentation des charges sur le départ 2.

Défaut sur départ 2 :

- modification : contribution du producteur au courant de court-circuit.
- risque : diminution du courant traversant D2 (fonction des impédances de liaisons et des sources) du fait de l'injection du producteur dans le court-circuit, jusqu'à une valeur inférieure à son seuil de déclenchement. D2 ne détectant pas le défaut, y est insensible. On peut trouver les termes d'aveuglement ou de désensibilisation des protections.

Globalement, il y a une modification du plan de protection.

B.4.6.4 Moyen de protection ou détection pour l'éviter. Solutions.
--

Défaut départ 1 : sur le principe de la détection du "sens du courant", qui repose sur le signe de la puissance active => Protection directionnelle de courant ou de puissance. Difficulté car faible valeur (voire valeur nulle) de la tension.

Défaut départ 2 : la protection ampèremétrique utilisée sur les réseaux en antenne avec des défauts alimentés unilatéralement par une production ou source centralisée, a son comportement singulièrement modifié et montre des limites par la présence de production décentralisée.

Solutions : relais directionnel ou dédié un départ au seul producteur.

## C ANALYSE THERMIQUE DE LA LIAISON D'ENERGIE DU PRODUCTEUR

### C.1 Câble : technologie

#### C.1.1 Fonction des différents constituants.

1. Âme : conduction du courant.
2. Ecran semi-conducteur : interface, équipotentielle. Homogénéisation du champ électrique pour éviter effet de pointe.
3. PR : isolation électrique.
4. Armature ou écran métallique: écran électromagnétique + collecteur du courant de défaut en cas de court-circuit.
5. PVC : protection mécanique, résistance à la traction et à l'écrasement (40 à 60 MN/ mm<sup>2</sup>; élongation PVC dur : 5 à 15%).

#### C.1.2 Section maximale en 20kV. Limites.

S<sub>max</sub> : 1200 mm<sup>2</sup> à 1600 mm<sup>2</sup>.

Limites : - de fabrication, rayon de courbure pour enroulage sur touret.

- de mise en oeuvre : jonctions, extrémités avec outillage et accessoires spécifiques.

(Ex EDF, transformateur 36 MVA raccordé avec 2 x 630 mm<sup>2</sup> ).

- économique : demande, standardisation + coût accessoires et outillage.

#### C.1.3 5 mots clés des problèmes de mise en œuvre .

Transport, pose, fixation, découpe, jonction, raccord à un équipement (appareillage, transformateur...)

### C.2 Loi fondamentale : équation de la chaleur.

#### C.2.1 Cohérence des unités des 3 membres de l'équation.

Équation aux dimensions : [kg.m<sup>-3</sup> x JK<sup>-1</sup>kg<sup>-1</sup> x Ks<sup>-1</sup>] + [m<sup>-1</sup> x Wm<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup> x Km<sup>-1</sup>] = [ Wm<sup>-3</sup>]

[Js<sup>-1</sup>.m<sup>-3</sup>] + [Wm<sup>-3</sup>] = [ Wm<sup>-3</sup>]

En 1 dimension  $\text{div}(-\lambda \text{ grad}T) = d/dx(-\lambda dT/dx)$

#### C.2.2 Interprétation physique .

L'interprétation de l'équation de la chaleur procède d'un bilan thermique.

Pertes	+ stockage	= production
Dissipation ou évacuation de chaleur	+ stockage de chaleur dans cp	= apport ou production interne d'énergie ou chaleur
Application au câble :		
évacuation de la chaleur vers l'air ambiant par conduction + convection à travers les différents matériaux + rayonnement	+ stockage dans les diverses couches	= pertes joules dans l'âme + pertes diélectriques + pertes joules dans armature

$$\text{C.2.3 Régime permanent : } \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{dT}{dr} \right) + q/\lambda = 0$$

Régime permanent :  $\partial T / \partial t = 0$

$\text{div}(-\lambda \overrightarrow{\text{grad}T}) = q$  . Si  $\lambda$  indépendant de  $r, \theta$  et  $z$  l'équation de la chaleur s'écrit :

$$\text{div}(\text{grad}T) + q/\lambda = 0.$$

En coordonnées cylindriques :

$$\text{div}(\text{grad}T) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right)$$

si  $T$  indépendant de  $\theta$  et  $z$ .

Avec les conditions précitées on obtient  $\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{dT}{dr} \right) + q/\lambda = 0$

### C.3 Conduction thermique appliquée au câble

#### C.3.1 Câble à 1 couche

##### C.3.1.1 Hypothèses.

Hypothèse 1 : Tâme = constante quel que soit  $r$  et  $L$ .

-  $\lambda_{\text{cuivre}} = 401 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  ,  $\lambda_{\text{alu}} = 237 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  . La conductibilité thermique des conducteurs électriques est très grande par rapport à celles des isolants électriques => pas de variation de température radialement.

- conducteurs infiniment long ou bords parfaitement isolés =>  $T$  indépendant de  $L$ .

Hypothèse 2 : flux de chaleur radial en raison :

- de la symétrie du câble  $T$  indépendant de  $\theta$

- de la longueur, supposée infinie, du câble, où les effets de bord sont négligés  $T$  indépendant de  $z$  ou  $l$

Par conséquent  $T$  dépend uniquement de  $r$ .  $T(r, \theta, z) \Rightarrow T(r)$

$$\text{C.3.1.2 } T(r) = T_i - \frac{(T_i - T_e)}{\ln r_e/r_i} \ln r/r_i.$$

Équation de la chaleur appliquée à l'isolant :  $T(r)$ , régime permanent et  $q = 0$  (pas de source de chaleur dans l'isolant).

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad \text{résultat du C.2.2}$$

1<sup>ère</sup> intégration  $r dT/dr = C1$

2<sup>ème</sup> intégration  $T(r) = C1 \ln r + C2$

avec conditions aux limites  $T(re) = T_e = C1 \ln re + C2$  et  $T(ri) = T_i = C1 \ln ri + C2$

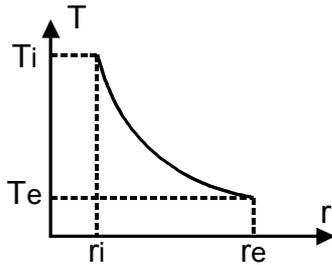
$$\Rightarrow T_i - T_e = C1 \ln(ri/re)$$

$$\Rightarrow C1 = (T_i - T_e) / \ln(ri/re) \quad \text{et} \quad C2 = T_i - (T_i - T_e) \ln(ri) / \ln(ri/re)$$

$$\text{d'où } T(r) = (T_i - T_e) [\ln(r) / \ln(ri/re)] + T_i - (T_i - T_e) [\ln(ri) / \ln(ri/re)]$$

$$T(r) = T_i - (T_i - T_e) \ln(r/ri) / \ln(re/ri)$$

C.3.1.3 Allure de T(r). Commentaires.



Commentaires

- décroissance (si  $T_i > T_e$ ) en log et non linéaire
- comme la surface extérieure > surface intérieure, la dissipation est meilleure par rapport à une structure plane.

C.3.1.4  $(T_i - T_e) = f(P, \lambda, L, r_e, r_i)$  .  $R_{thPR} = \ln(r_e/r_i)/(2\pi\lambda L)$  .

$R_{th} = \Delta T / P$

Loi de Fourier  $\Phi = -\lambda S \text{ grad}T = -\lambda S \text{ d}T/\text{d}r$  car T indépendant de  $\theta$  et z;

$\Rightarrow \text{d}T = -(\Phi / \lambda S) \text{ d}r$ . En prenant  $S = 2\pi r L$  L longueur

$$\text{d}T = -\frac{\Phi}{\lambda 2\pi r L} \text{d}r \Rightarrow \int_{T_i}^{T_e} \text{d}T = \int_{r_i}^{r_e} -\frac{\Phi}{\lambda 2\pi r L} \text{d}r \Rightarrow T_i - T_e = \frac{P}{\lambda 2\pi L} \ln(r_e / r_i) \quad \text{avec } P = \Phi$$

$$\Rightarrow R_{th} = \frac{\ln(r_e / r_i)}{2\pi \lambda L}$$

unités :  $\text{W}^{-1} \text{ m K m}^{-1} = \text{K/W}$  ou  $^\circ\text{C/W}$  (pratique)

Rth par unité de longueur ( $L = 1\text{m}$ ) =  $R_{th} = \frac{\ln(r_e / r_i)}{2\pi \lambda}$  en  $\text{K W}^{-1} \text{ m}^{-1}$

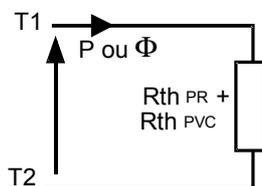
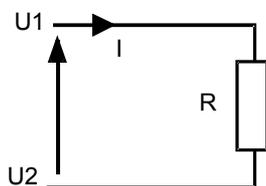
A.N :  $r_i = 9,2\text{mm}$   $r_e = 16,3 \text{ mm}$   $\lambda_{PR} = 0,28 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$   $R_{th} = 0,32 \text{ }^\circ\text{C/W.m}$

C.3.2 Câbles à 2 couches

C.3.2.1 Rth totale.

$$R_{th \text{ totale}} = R_{th PR} + R_{th PVC} = \frac{\ln(r_1 / r_i)}{2\pi \lambda_{PR} L} + \frac{\ln(r_e / r_1)}{2\pi \lambda_{PVC} L} = 0,32 + 0,18 \text{ }^\circ\text{C} / \text{W.m} \text{ pour } L = 1\text{m.}$$

C.3.2.2 Dessin et analogie électrique du modèle thermique.



$U \leftrightarrow T$   
 $I \leftrightarrow \Phi \text{ ou } P$   
 $R \leftrightarrow R_{th}$

C.4 Conduction et convection thermiques appliquées au câble

C.4.1 Câble à 1 couche.

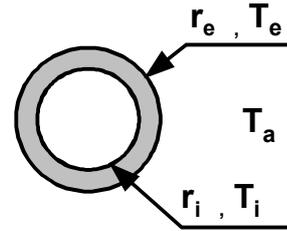
C.4.1.1 Relation entre coefficients d'échange thermique.

Conservation du flux de chaleur  $P = \Phi = -\lambda S(r) \text{ grad}T = -\lambda S(r) \text{ d}T/\text{d}r = h S_{\text{externe}} (T_e - T_a)$

C.4.1.2  $T_i - T_a = f(P, r_e, r_i, \lambda, h, L)$

$$P = \Phi = -\lambda S \text{ grad}T = -\lambda S \frac{dT}{dr}$$

$$\Rightarrow T_i - T_e = P \times \ln(r_e/r_i) / (2\pi \lambda L)$$



On obtient  $T_e$  à partir de la loi de Newton :  $P = \Phi = h S (T_e - T_a) \Rightarrow T_e - T_a = P / (h 2\pi r_e L)$

$$\Rightarrow T_i - T_a = P \left[ \frac{\ln(r_e/r_i)}{2\pi\lambda_{PR}L} + \frac{1}{h2\pi r_e L} \right]$$

Il apparaît une résistance thermique de convection  $R_{th \text{ convection}} = 1 / (2\pi r_e h L)$

$$T_i - T_a = P \times \Sigma R_{th} = P \times (R_{thPR} + R_{thPVC} + R_{th \text{ convection}})$$

**C.4.2 Application au câble à 2 couches. Intensité admissible.**

C.4.2.1 I admissible = f( $T_i, T_a, r_e, r_i, \dots$ ).

$$P = RI^2 = \rho(T) L / S_{âme} I^2 \Rightarrow I^2 = \frac{S_{âme}}{\rho_{90^\circ}} \frac{(T_i - T_a)}{\Sigma R_{th \text{ lineique}}} \Rightarrow I = \sqrt{\frac{S_{âme}}{\rho_{90^\circ}} \frac{(T_i - T_a)}{\Sigma R_{th \text{ lineique}}}}$$

avec  $\Sigma R_{th} = R_{thPR} + R_{thPVC} + R_{th \text{ convection}}$

Expression à rapprocher de celle indiquée par la norme C13-205  $I = 10^B S^A$  avec  $B=1,262$  et  $A = 0,61$  (section de 16 à 630mm<sup>2</sup>)

C.4.2.2 Valeur de I admissible.

$$S_{âme} = 240\text{mm}^2 \quad T_i - T_a = 60^\circ\text{C}$$

$$\rho_{90^\circ} = \rho_{20^\circ} \frac{1 + a.90^\circ}{1 + a.20^\circ} = \rho_{20^\circ} \cdot 0,917 \cdot (1 + a.90^\circ) = 3,44 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$$

$$R_{thPR} + R_{thPVC} = \frac{\ln(r_1/r_i)}{2\pi\lambda_{PR}L} + \frac{\ln(r_e/r_1)}{2\pi\lambda_{PVC}L} = 0,32 + 0,18^\circ\text{C/W pour 1 m du C.3.2.1}$$

$$R_{th \text{ convection}} = 1 / (2\pi r_e h L) = 0,73^\circ\text{C/W pour 1 m et } h = 10 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

$$\Sigma R_{th \text{ linéique}} = R_{thPR} + R_{thPVC} + R_{th \text{ convection}} = 0,32 + 0,18 + 0,73 = \underline{1,23^\circ\text{C/W.m}}$$

$I_{admissible} = 583 \text{ A}$  Norme C13-205 : 510 A

Pour  $h = 20$   $R_{th \text{ conv}} = 0,37^\circ\text{C/W.m}$   $I_{admissible} = 693 \text{ A}$

Pour  $h = 5$   $R_{th \text{ conv}} = 1,46^\circ\text{C/W.m}$   $I_{admissible} = 462 \text{ A}$

La modélisation thermique satisfaisante aboutit à un résultat cohérent avec la norme.

## C.5 Intensité admissible dans le câble en conditions réelles. Calcul avec le guide UTE C13-205.

C.5.1  $I_{\text{admissible}} > I_{\text{centrale cogénération}} = 436 \text{ A} ?$

Méthode : on prend en compte les conditions d'installations qui sont caractérisés par les facteurs ou coefficients (0,9 - f1 - f2 et f3 si le câble est enterré).

Tableau BA		Valeur
mode de pose : N alvéoles ou P blocs manufacturés	tableau 52C : col 3 x 0,9	510 x 0,9
correction température : $T_{\text{ambiant}} = 30^{\circ}\text{C}$	coefficient f1 : tableau D1	f1 = 1
correction groupement de circuits : 4 circuits	coefficient f2 : tableau E2, ligne F	f2 = 0,75

$I_{\text{admissible}} = I_{\text{admissible}} \text{ câble à l'air libre} \times 0,9 \times 1 \times 0,75 = 344 \text{ A}$

Valeur inférieure à  $I_{\text{centrale cogénération}} = 436 \text{ A}$ . La liaison ne peut évacuer la production de la centrale de cogénération.

Avec un câble en cuivre de même section ( $240 \text{ mm}^2$ ) et les mêmes conditions

$I_{\text{admissible}} = 660 \times 0,9 \times 1 \times 0,75 = 445 \text{ A}$ .

C.5.2 Proposition de 4 solutions :

- issues des données du tableau : mode de pose, section S, et matériau Alu ou Cuivre.
- issues du problème : puissance P et facteur de puissance.

- changer de matériau en passant en  $240 \text{ mm}^2$  cuivre
- augmenter la section du câble d'aluminium : ex en 2 fois  $240 \text{ mm}^2$  alu (doubler le câble)
- diminuer la puissance P délivrée par le producteur
- augmenter le facteur de puissance du producteur

C.5.3 Mesure de température avec d'autres procédés qu'électriques (résistance, thermocouple, jonction...).

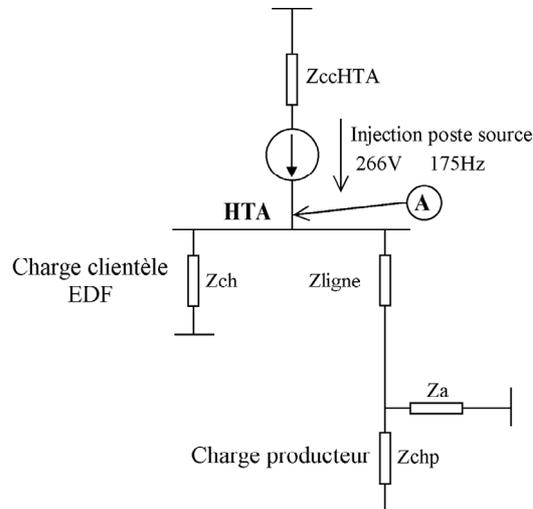
- par rayonnement thermique infrarouge (thermomètre, scanner, caméra). Principe : mesure de l'énergie rayonnée et lien avec la température T par loi de Stéphan  $M = \epsilon \sigma T^4$ . Problème : taille de la cible ou puissance rayonnée vers le capteur sont faibles car la surface d'émission est bombée et non plane + problème de connaître  $\epsilon(\lambda)$  où  $\lambda$  longueur d'onde.

- par énergie lumineuse. Principe : variation du temps de vie d'un matériau fluorescent en fonction de la température. Avantage : insensibilité aux perturbations électromagnétiques et tenue diélectriques élevées. Des exemples peuvent être consultés aux adresses suivantes :  
[http://www.geo.com/technologies/capteurs/exemples/capteur\\_temp/capteur\\_temp.htm](http://www.geo.com/technologies/capteurs/exemples/capteur_temp/capteur_temp.htm)  
<http://www.luxtron.com/>

## D FILTRE PASSIF ET ACTIF POUR BOUCHONNAGE 175-188 HZ DES AUTOPRODUCTEURS

### D.1 Problématique

#### D.1.1 Simplification du schéma équivalent pour les signaux de télécommande.



#### D.1.2 Précaution avec les impédances.

Les impédances doivent être calculées ou mesurées à la fréquence des signaux de télécommande, ici, 175Hz.

#### D.1.3 Réactance longitudinale. Réactance synchrone, transitoire, subtransitoire. Sens, signification.

L'inducteur de la machine est à pôles saillants. Il faut donc distinguer, dans la modélisation, les valeurs des inductances selon que les pôles du rotor sont dans la direction des pôles statoriques (réactance **longitudinale**) ou en quadrature (dans l'espace électrique) par rapport à ces derniers (réactance transversale).

La réactance **synchrone** est la réactance équivalente aux trois phases de la machine parcourues par des courant triphasés équilibrés. Les mutuelles inductances entre phase interviennent dans la valeur de cette inductance.

Les réactance et constante de temps **transitoires** représentent respectivement la réactance de fuite de l'inducteur sur l'induit ramenée à l'induit (les amortisseurs de Leblanc étant ouverts) et la constante de temps associée.

Les réactance et constante de temps **subtransitoires** représentent respectivement la réactance de fuite de l'inducteur sur les amortisseurs et l'induit ramenée à l'induit et la constante de temps associée.

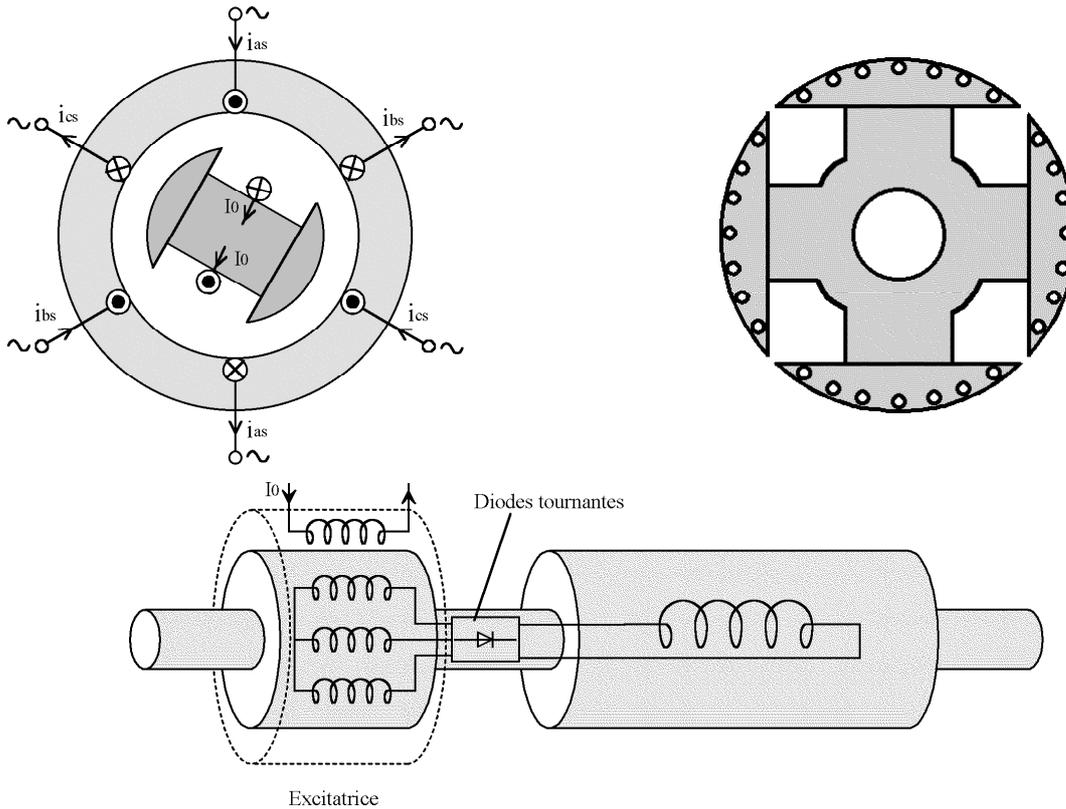
#### D.1.4 Passage de X% à X en $\Omega$ .

$$X\% = 100 X \frac{I_n}{V_n} \quad \text{avec } I_n \text{ et } V_n \text{ courant et tension nominale de la machine}$$

$$X = \frac{X\% V_n}{100 I_n}$$

D.1.5 Particularités technologiques des alternateurs pour les réactances subtransitoires. Représentation en coupe. Mode d'alimentation de l'inducteur.

Les réactances subtransitoires sont liées aux amortisseurs de Leblanc. Pratiquement, cet amortisseur est constitué de barres de cuivre noyées dans les épanouissement polaires. Ces barres peuvent être reliées indépendamment aux extrémités de chaque pôle (les amortisseurs sont alors indépendants) ou au contraire réunies par deux couronnes de cuivre de part et d'autre des pôles (amortisseur à cage d'écureuil).



D.1.6  $R_{ch}$  et  $X_{ch}$  charge, en série, présentant la même impédance à 175Hz vue du réseau HTA.

$$\underline{Z}_{ch} = \frac{jL_p \omega (R_s + jL_s \omega)}{R_s + j(L_p + L_s) \omega} \text{ donne } R_{ch} = R_s \frac{L_p^2 \omega^2}{R_s^2 + (L_p + L_s)^2 \omega^2} \text{ et}$$

$$X_{ch} = L_p \omega \frac{R_s^2 + L_s (L_p + L_s) \omega^2}{R_s^2 + (L_p + L_s)^2 \omega^2}$$

AN :  $R_{ch} = 12,44\Omega$  et  $X_{ch} = 10,49\Omega$  (à 175Hz)

D.1.7 Impact de l'autoproduit. Taux de signal de télécommande centralisée  $\tau_{HTA_0}$  et  $\tau_{HTA}$ .

$X_{cc} = 13,30\Omega$ ,  $X_a = 35,95\Omega$

$$\tau_{HTA_0} = \tau_0 \left| \frac{12,44 + j10,49}{12,44 + j(10,49 + 13,30)} \right| \quad \underline{AN} : \tau_{HTA_0} = \tau_0 0,606 = 2,3 \times 0,606 = 1,39\%$$

Pour  $\tau_{HTA}$ , il faut calculer la charge équivalente à la charge EDF et à l'autoproducteur en parallèle.

$$\underline{Z}_{ch_{eq}} = \frac{jX_a (R_{ch} + jX_{ch})}{R_{ch} + j(X_a + X_{ch})} \text{ donne } R_{ch_{eq}} = R_{ch} \frac{X_a^2}{R_{ch}^2 + (X_a + X_{ch})^2} \text{ et}$$

$$X_{ch_{eq}} = X_a \frac{R_{ch}^2 + X_{ch}(X_a + X_{ch})}{R_{ch}^2 + (X_a + X_{ch})^2}$$

$$\underline{AN} : R_{ch_{eq}} = 6,96\Omega \text{ et } X_{ch_{eq}} = 9,98\Omega$$

$$\tau_{HTA} = \tau_0 \left| \frac{6,96 + j9,98}{6,96 + j(9,98 + 13,30)} \right| \quad \underline{AN} : \tau_{HTA} = 1,15\%$$

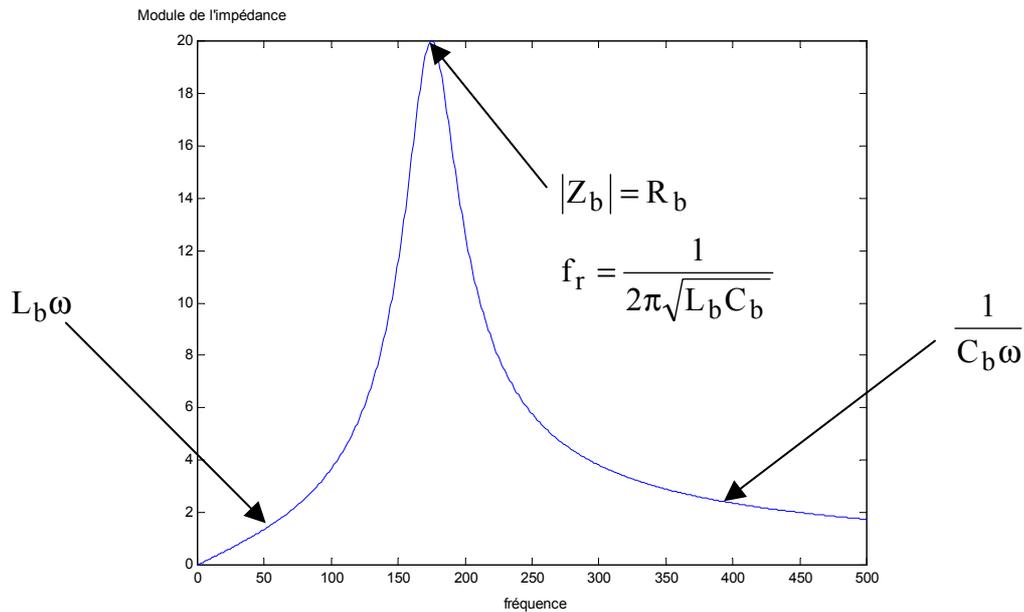
D.1.8 Impact de l'autoproducteur. Taux minimum 1,3627%.

On est en dessous du taux minimum. Les impédances présentées par l'autoproducteur à la fréquence de télécommande de 175Hz est trop faible. Le fonctionnement décrit dans cette partie n'est donc pas admissible.

## D.2 Circuit bouchon passif

D.2.1 Expression de  $Z_b(p)$  (rapport de deux polynômes). Allure du module  $f$ (fréquence). Equations des courbes asymptotiques. Fréquence et module de  $Z_b$  au maximum de la courbe.

$$Z_b(p) = \frac{L_b p}{1 + \frac{L_b}{R_b} p + L_b C_b p^2}$$



D.2.2  $R_b = (f(Q) \cdot Q)$ .  $Q$  : coefficient de qualité de l'inductance à 175Hz. Origines des pertes.

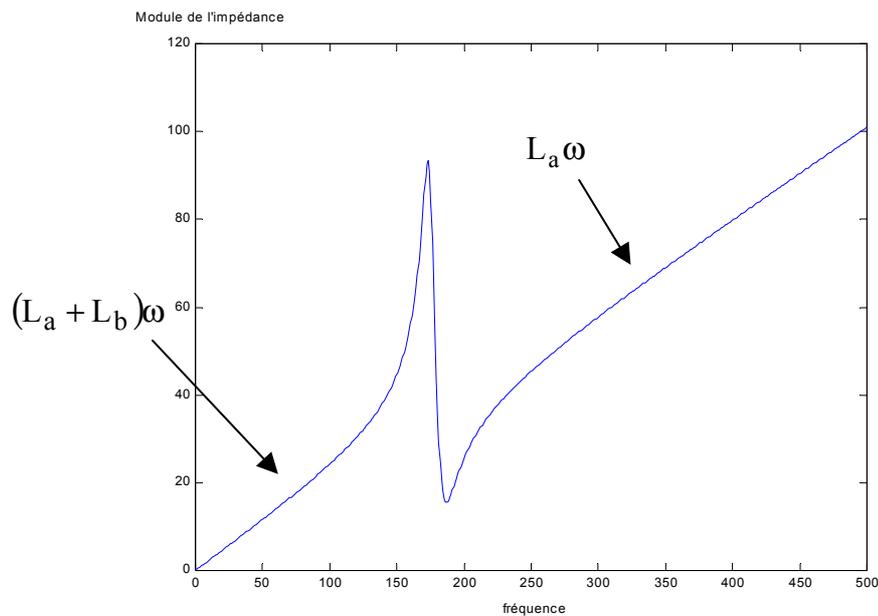
$$Q_{175\text{Hz}} = \frac{R_b}{L_b \times 2\pi \times 175} \quad \text{ceci nous donne} \quad R_b = Q_{175\text{Hz}} \times L_b \times 2\pi \times 175$$

Ces pertes représentent l'effet cumulé des pertes fer et des pertes cuivre. Les premières sont situées dans le circuit magnétique et les secondes dans les conducteurs.

D.2.3  $Z_{a_{\text{tot}}}(p)$ , vue du poste source, correspondant au producteur indépendant (rapport de deux polynômes). Allure de  $Z$  et équations des courbes asymptotiques.

$$Z_{a_{\text{tot}}}(p) = Z_b(p) + L_a p \quad \text{donc}$$

$$Z_{a_{\text{tot}}}(p) = \frac{(L_b + L_a)p \left( 1 + \frac{L_a L_b}{(L_a + L_b)R_b} p + \frac{L_a L_b}{(L_a + L_b)C_b} p^2 \right)}{1 + \frac{L_b}{R_b} p + L_b C_b p^2}$$



D.2.4 Intérêt du filtre bouchon dans le problème d'amortissement des signaux de télécommande. Valeur de la fréquence souhaitée pour le maximum de  $Z_{a_{\text{tot}}}$ .

Le filtre bouchon permet d'augmenter de façon importante l'impédance de l'autoproduiteur à condition de se trouver autour de la fréquence de résonance de l'ensemble.

Pour une plus grande efficacité la fréquence de résonance devra être choisie égale à 175Hz.

D.2.5 Position des fréquences correspondant aux maximums de  $Z_{a_{\text{tot}}}$  et  $Z_b$ . Ecart entre les deux fréquences quand  $Q$  augmente. Valeur limite de  $L_b$ .

L'inductance équivalente représentant l'impédance de l'autoproduiteur seul ajoute un terme en  $jL_a\omega$  à l'impédance du circuit bouchon  $Z_b$ . Cette courbe étant linéaire croissante, le maximum de l'impédance totale va se trouver déplacée vers la droite.

Quand le coefficient de qualité augmente la valeur supplémentaire apportée par le terme  $jL_a\omega$  à la résonance devient négligeable et la fréquence de résonance reste inchangée.

Tous ceci nous amène à la valeur limite suivante :

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_b C_b}} \leq 175\text{Hz} \quad \text{donc} \quad L_b \geq \frac{1}{(2\pi \times 175)^2 C_b}$$

D.2.6 Limite précédente avec tolérance de 4% sur C.

$$\text{Valeur minimale pour } C_b \text{ maximale, donc : } L_b \geq \frac{1}{(2\pi \times 175)^2 \times 207\mu\text{F} \times 1,04} = 3,84\text{mH}$$

D.2.7 Impédance équivalente à l'autoproduiteur avec 3 bouchons .  $Z_{a_{\text{tot}}} = R_{a_{\text{tot}}} + jX_{a_{\text{tot}}}$ .

$$\underline{Z}_b(j\omega) = \frac{jL_b\omega}{1 - L_b C_b \omega^2 + j\frac{L_b}{R_b}\omega}$$

$$\underline{Z}_b(j\omega) = \frac{(L_b\omega)^2}{R_b \left[ (1 - L_b C_b \omega^2)^2 + \left(\frac{L_b}{R_b}\omega\right)^2 \right]} + j \frac{L_b\omega(1 - L_b C_b \omega^2)}{(1 - L_b C_b \omega^2)^2 + \left(\frac{L_b}{R_b}\omega\right)^2}$$

$$\underline{Z}_b(j\omega) = \frac{(L_b\omega)^2}{R_b \left[ (1 - L_b C_b \omega^2)^2 + \left(\frac{L_b}{R_b}\omega\right)^2 \right]} + j \frac{L_b\omega(1 - L_b C_b \omega^2)}{(1 - L_b C_b \omega^2)^2 + \left(\frac{L_b}{R_b}\omega\right)^2}$$

$$\text{à } 175\text{Hz} : \underline{Z}_b(j\omega) = 241,06 - j14,24$$

$$\text{donc } \underline{Z}_{a_{\text{tot}}} = \underline{Z}_b + jX_a = 241,06 + j21,71$$

D.2.8 Impact de l'autoproduiteur. Taux  $\tau_{\text{HTA bouchon}}$  . Compatibilité avec le cahier des charges.

Pour  $\tau_{\text{HTA bouchon}}$ , il faut calculer la charge équivalente à la charge EDF et à l'autoproduiteur en parallèle.

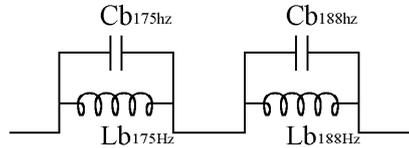
$$\underline{Z}_{\text{ch}_{\text{eq}}} = \frac{(R_{a_{\text{tot}}} + jX_{a_{\text{tot}}})(R_{\text{ch}} + jX_{\text{ch}})}{(R_{a_{\text{tot}}} + R_{\text{ch}}) + j(X_a + X_{\text{ch}})} = R_{\text{ch}_{\text{eq}}} + jX_{\text{ch}_{\text{eq}}}$$

$$\underline{\text{AN}} : R_{\text{ch}_{\text{eq}}} = 12,14\Omega \quad \text{et} \quad X_{\text{ch}_{\text{eq}}} = 9,50\Omega$$

$$\tau_{HTA_{\text{bouchon}}} = \tau_0 \left| \frac{12,14 + j9,50}{12,14 + j(9,50 + 13,30)} \right| \quad \underline{AN} : \tau_{HTA_{\text{bouchon}}} = 1,37\%$$

### D.2.9 Schéma de principe pour traiter le 175Hz et 188Hz

Il faut associer deux circuits bouchons en série. L'un traitant le 175Hz l'autre le 188Hz.



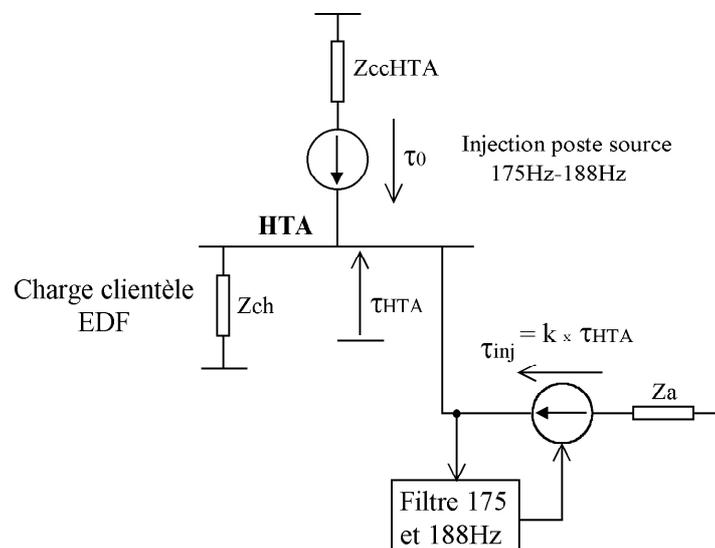
### D.2.10 Critique du circuit bouchon passif. Efficacité dans le temps.

Cette méthode de réduction d'impact présente un certain nombre d'inconvénient :

- L'efficacité est très sensible à la fréquence d'accord des circuits bouchons ;
- La valeur de la capacité dépend de la température provoquant ainsi une modification de la fréquence d'accord ;
- Il y a présence d'une anti-résonance après la résonance du circuit bouchon. Cette anti-résonance dépend de l'impédance équivalente de l'auto producteur et ne doit surtout pas se situer à la fréquence de 188Hz sous peine d'amortir les signaux de télécommande à 188Hz ;
- Le traitement de deux fréquences de télécommande est complexe du fait des interactions entre circuits bouchons rendant ;
- Les valeurs des composants dérives dans le temps, l'efficacité de cette méthode n'est pas garantie à terme ;
- Ces circuits provoquent une chute de tension non négligeable à 50Hz ;

## D.3 Filtre actif série (FAS)

### D.3.1 Simplification du schéma équivalent. pour les signaux de télécommande.



D.3.2 Relation entre  $\underline{Z}_{a_{eq}}$  et  $\underline{Z}_a$  (autoproducteur + FAS et autoproducteur seul)

$$\underline{V}_{HTA_{175Hz}} = k \underline{V}_{HTA_{175Hz}} + \underline{Z}_a \underline{I}_{a_{175Hz}}$$

$$\underline{Z}_{a_{eq}} = \frac{\underline{V}_{HTA_{175Hz}}}{\underline{I}_{a_{175Hz}}} = \frac{\underline{Z}_a}{1-k}$$

D.3.3 Valeur de k pour lequel l'autoproducteur n'a plus d'influence.  $k >$  valeur précédente.

Quand k est égal à 1 l'impédance équivalente à l'autoproducteur équipé du FAS est infinie.

Si k est plus grand que 1, l'impédance équivalente change de signe.

D.3.4 Impact de l'autoproducteur + FAS.  $\tau_{HTA_{FAS}} = f(k)$ .

En reprenant les calculs de la question D.1.7.

Pour  $\tau_{HTA_{FAS}}$ , il faut calculer la charge équivalente à la charge EDF et à l'autoproducteur en parallèle.

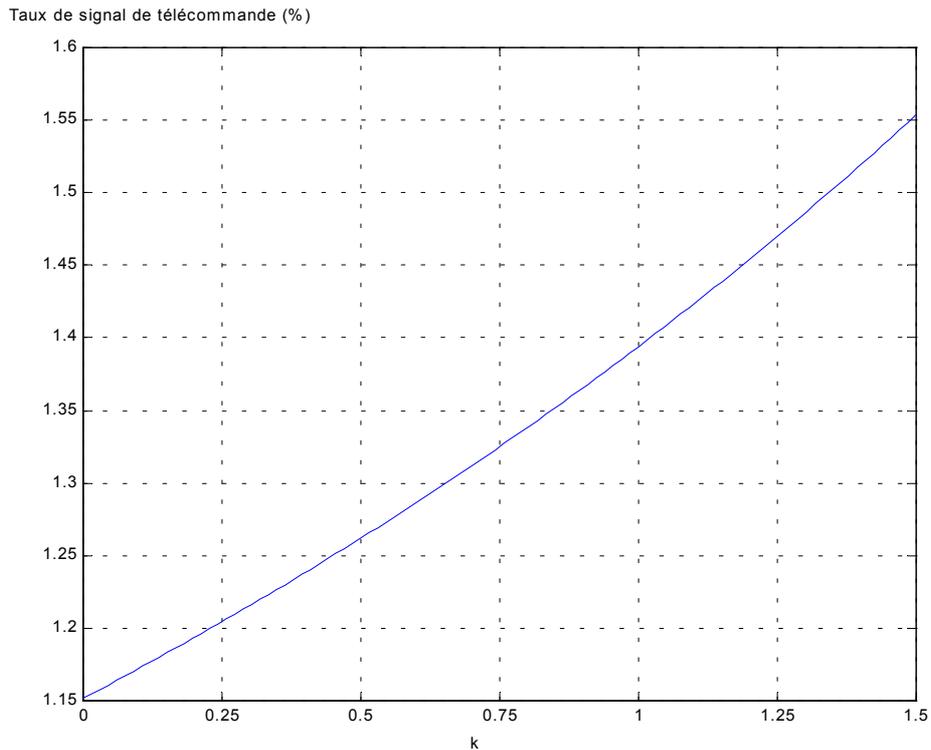
$$\underline{Z}_{ch_{eq}} = \frac{jX_{a_{eq}} (R_{ch} + jX_{ch})}{R_{ch} + j(X_{a_{eq}} + X_{ch})} \text{ donne } R_{ch_{eq}} = R_{ch} \frac{X_{a_{eq}}^2}{R_{ch}^2 + (X_{a_{eq}} + X_{ch})^2} \text{ et}$$

$$X_{ch_{eq}} = X_{a_{eq}} \frac{R_{ch}^2 + X_{ch}(X_{a_{eq}} + X_{ch})}{R_{ch}^2 + (X_{a_{eq}} + X_{ch})^2}$$

$$\underline{AN} : R_{ch_{eq}} = \frac{12,44 \times \left(\frac{35,95}{1-k}\right)^2}{12,44^2 + \left(10,49 + \frac{35,95}{1-k}\right)^2} \text{ et } X_{ch_{eq}} = \frac{35,95}{1-k} \times \frac{12,44^2 + 10,49 \times \left(10,49 + \frac{35,95}{1-k}\right)}{12,44^2 + \left(10,49 + \frac{35,95}{1-k}\right)^2}$$

$$\tau_{HTA} = \tau_0 \left| \frac{R_{ch_{eq}} + jX_{ch_{eq}}}{R_{ch_{eq}} + j(X_{ch_{eq}} + X_{cc})} \right| = \tau_0 \sqrt{\frac{R_{ch_{eq}}^2 + X_{ch_{eq}}^2}{R_{ch_{eq}}^2 + (X_{ch_{eq}} + X_{cc})^2}}$$

D.3.5  $\tau_{HTA_{FAS}} = f(k)$  pour  $k \in [0; 1,5]$ . Valeurs pour  $k = (0; 0,5; 1; 1,2; 1,5)$ .



Pour  $k=1$  on retrouve la valeur de 1,39% de la première partie. De même nous retrouvons 1,15 % pour  $k=0$  ce qui est équivalent à l'absence de FAS.

Les valeurs demandées sont :

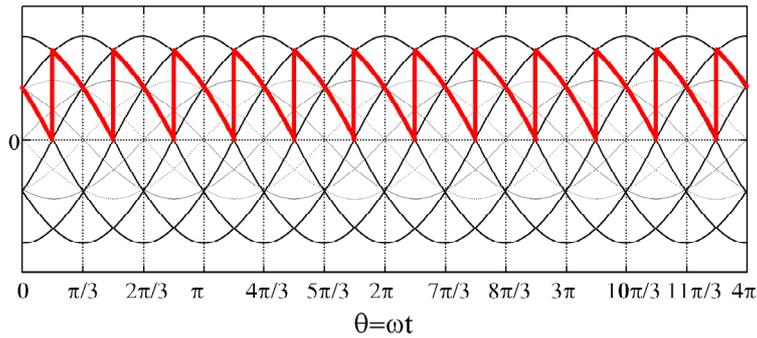
k	$\tau_{HTA_{FAS}}$
0	1,15 %
0,5	1,26 %
1	1,39 %
1,2	1,45 %
1,5	1,55 %

D.3.6 Gain ( $\alpha$ ) sur le taux HTA quand  $k > 1$ . Conclusion.

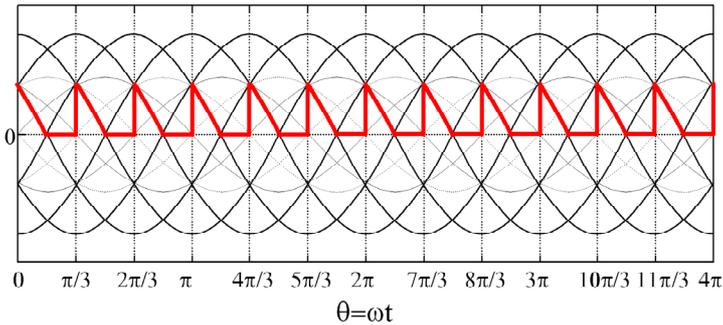
Le gain  $\alpha$  devient plus grand que 1. Le signal de télécommande résultant de la mise en place du FAS est amplifié car plus important que celui qui serait obtenu en l'absence de l'autoproducteur.

D.3.7 Représenter sur le document réponse REP.D.1 la tension de sortie ( $U_r$ ) du redresseur pour trois angles de commande du redresseur :  $\psi = \pi/3$ ,  $\psi = \pi/2$  et  $\psi = 2\pi/3$ .

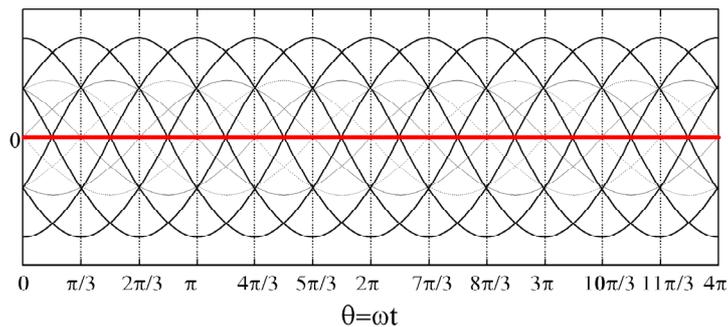
Pour  $\psi = \pi/3$  :



Pour  $\psi = \pi/2$  :



Pour  $\psi = 2\pi/3$  :



D.3.8 Tension moyenne  $\langle U_r \rangle = f(V_{Ph}, \psi)$ .

$$\langle U_r \rangle = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} V_{Ph} \cos \psi \quad \text{pour} \quad \psi \leq \pi/3$$

$$\langle U_r \rangle = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} V_{Ph} (1 - \sin(\psi - \pi/6)) \quad \text{pour} \quad \pi/3 \leq \psi \leq 2\pi/3$$

$$\langle U_r \rangle = 0 \quad \text{pour} \quad 2\pi/3 \leq \psi < \pi$$

D.3.9 Relation entre  $\langle U_{ond} \rangle$  et  $\langle U_r \rangle$ . Justification.

$\langle U_{ond} \rangle = \langle U_r \rangle$  car la tension moyenne aux bornes de l'inductance de lissage ou de filtrage est nulle en régime permanent.

D.3.10 Puissance active fournie par le FAS. Puissance transitant au travers du redresseur PD3.

$$\underline{Z}_{FAS} = \frac{\underline{Z}_a}{1-k} - \underline{Z}_a = \frac{k}{1-k} \underline{Z}_a = j \frac{k}{1-k} X_a$$

$P_{FAS} = 0$  car l'impédance équivalente au FAS est également purement réactive.

La puissance transiting dans le pont PD3 est donc en théorie nulle.

#### D.3.11 Utilité du convertisseur. Puissance active réelle dans le redresseur PD3.

Le pont PD3 voit en fait transiter une puissance correspondant aux pertes dans les différents éléments du FAS. Il permet également d'imposer assez aisément la tension continue d'alimentation de l'onduleur.

#### D.3.12 Caractéristiques des IGBT. Plan puissance commutée/fréquence de commutation. Autres composants et plan puissance commutée/fréquence de commutation.

L'IGBT est, de façon très schématique, l'association d'un transistor bipolaire et d'un MOSFET. Se composant allie donc la facilité de commande des MOSFET (commande en tension par charge et décharge d'une grille) et la faible chute de tension à l'état passant du bipolaire obtenue grâce à l'injection de porteurs dans les zones faiblement dopées du composant à semiconducteur.

L'IGBT est utilisé dans des gammes de fréquence s'étendant de quelques centaines de Hz à une centaine de kHz. La puissance commutée varie en sens inverse de quelques MVA à quelques kVA.

Citons d'autres composants : Les transistors MOSFET, COOLMOS, GTO, IGCT

Les MOSFET et COOLMOS ont des applications en faible puissance, haute fréquence de commutation. Alors que les transistors GTO sont utilisés dans des applications fortes puissance et faible fréquence de commutation.

#### D.3.13 Rôle des diodes placées en anti-parallèle sur les IGBT.

Dans un fonctionnement en onduleur de tension, comme s'est le cas ici, les interrupteurs doivent pouvoir faire circuler des courants négatifs. L'IGBT n'ayant pas cette propriété, les diodes anti-parallèles sont indispensables.

#### D.3.14 Rôle des inductances $L_s$ en sortie d'onduleur (schéma fig D.7).

En absence des inductances les transistors IGBT commuteraient, lors de leur fermeture, des courants capacitifs très importants correspondant à la charge brutale des capacités  $C_s$  et  $CFM$ . La règle d'association des sources n'est donc pas respectée pour ce convertisseur sans l'insertion d'inductances  $L_s$  en série dans chacune des phases de l'onduleurs. Ces inductances permettent le lissage haute fréquence des courants onduleur.

#### D.3.15 Relation liant les trois tensions de commande.

$$u_{c13}(n) + u_{c21}(n) + u_{c32}(n) = 0$$

#### D.3.16 $\alpha_{OND1}(n)$ , $\alpha_{OND2}(n)$ et $\alpha_{OND3}(n) = f(u_{c13}, u_{c21}, u_{c32} \text{ et } U_{cM})$ .

$$\alpha_{\text{OND1}}(n) = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{u_{c13}(n)}{U_{cM}} \right)$$

$$\alpha_{\text{OND2}}(n) = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{u_{c21}(n)}{U_{cM}} \right)$$

$$\alpha_{\text{OND3}}(n) = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{u_{c32}(n)}{U_{cM}} \right)$$

D.3.17 Tensions moyennes  $\langle v_{AO} \rangle_{T_d}$ ,  $\langle v_{BO} \rangle_{T_d}$  et  $\langle v_{CO} \rangle_{T_d}$ . Relation entre ces trois tensions.

$$\langle v_{AO} \rangle_{T_d} = \alpha_{\text{OND1}} \times U_{\text{ond}} = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{u_{c13}(n)}{U_{cM}} \right) \times U_{\text{ond}}$$

$$\langle v_{BO} \rangle_{T_d} = \alpha_{\text{OND2}} \times U_{\text{ond}} = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{u_{c21}(n)}{U_{cM}} \right) \times U_{\text{ond}}$$

$$\langle v_{CO} \rangle_{T_d} = \alpha_{\text{OND3}} \times U_{\text{ond}} = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{u_{c32}(n)}{U_{cM}} \right) \times U_{\text{ond}}$$

En utilisant le résultat de la question D.3.15 nous obtenons :

$$\langle v_{AO} \rangle_{T_d} + \langle v_{BO} \rangle_{T_d} + \langle v_{CO} \rangle_{T_d} = \frac{3}{2} U_{\text{ond}}$$

D.3.18 Tension instantanée  $v_{N'O} = f(v_{AO}, v_{BO} \text{ et } v_{CO})$ . Valeur de  $\langle v_{N'O} \rangle_{T_d}$ .

$v_{AN'} + v_{BN'} + v_{CN'} = 0$  donc en faisant apparaître le point O :

$$v_{N'O} = \frac{1}{3} (v_{AO} + v_{BO} + v_{CO})$$

$$\langle v_{N'O} \rangle_{T_d} = \frac{U_{\text{ond}}}{2}$$

D.3.19 Relations entre  $\langle v_{XN'} \rangle_{T_d}$  (X=A, B ou C) et  $\langle v_{XO} \rangle_{T_d}$ . Expressions de  $\langle v_{AN'} \rangle_{T_d}$ ,  $\langle v_{BN'} \rangle_{T_d}$  et  $\langle v_{CN'} \rangle_{T_d} = f(\alpha_{\text{OND1}}(n), \alpha_{\text{OND2}}(n) \text{ et } \alpha_{\text{OND3}}(n))$ .

$$\langle v_{AN'} \rangle_{T_d} = \langle v_{AO} \rangle_{T_d} - \frac{U_{\text{ond}}}{2}$$

$$\langle v_{BN'} \rangle_{T_d} = \langle v_{BO} \rangle_{T_d} - \frac{U_{\text{ond}}}{2}$$

$$\langle v_{CN'} \rangle_{T_d} = \langle v_{CO} \rangle_{T_d} - \frac{U_{\text{ond}}}{2}$$

$$\langle v_{AN'} \rangle_{T_d} = \frac{1}{2} \frac{u_{c13}(n)}{U_{cM}} \times U_{ond}$$

$$\langle v_{BN'} \rangle_{T_d} = \frac{1}{2} \frac{u_{c21}(n)}{U_{cM}} \times U_{ond}$$

$$\langle v_{CN'} \rangle_{T_d} = \frac{1}{2} \frac{u_{c32}(n)}{U_{cM}} \times U_{ond}$$

D.3.20 Amplitude maximale des trois tensions moyennes. Principes de commande pour atteindre des valeurs maximales plus importantes.

Les tensions peuvent atteindre une amplitude maximale égale à  $U_{ond} / 2$ .

Les commandes superposant à la tension de référence sinusoïdale un harmonique de rang trois d'amplitude convenable permet d'augmenter cette valeur. Il est également possible d'utiliser une MLI dite vectorielle permettant d'atteindre une valeur maximale égale à  $U_{ond} / \sqrt{3}$ .