

Influence des charges non linéaires dans les réseaux de bord: application aux réseaux d'avion

F. Barruel, J-L. Schanen, N. Retiere, J. Roudet

Le Master "CSEE"

Architectures
Régulation
Cours/TD 30h
BE 12h ECTS 3

Contrôle Commande des réseaux

Comportement dynamique des
machines électriques (ENSIEG)
Réseaux Industriels (ENSIEG)
Protections (ENSIEG)
Cours/TD 74 h
Mise en application sur préseau
(ENSIEG) BE 20 h ECTS 9

Electrotechnique des réseaux

PROJET INTEGRATEUR (150 h) ECTS 15

Conception d'un système d'Energie Electrique : ex d'un réseau de bord de voiture

<p>Conception usuelle : -cahier des charges - aspects technico-économique</p> <p>30 h</p>	<p>Conception innovante : Aspects statiques (Load-flow)</p> <p>30 h</p>	<p>Conception innovante : Aspects dynamique (Régulations / stabilité)</p> <p>30 h</p>	<p>Conception innovante : Aspects harmoniques (Filtrage)</p> <p>30 h</p>	<p>Simulation Système Validation (SABER)</p> <p>30 h</p>
---	---	---	--	--

Electronique de Puissance

- Structures d'électronique de Puissance* (Prérequis IUP3)
- Commande des structures (ENSIEG)
- Compatibilité ElectroMagnétique (ENSIEG)

Cours/TD 52h BE 28h ECTS 9

Transformation de l'énergie

Sources d'énergie Primaire
(ENSIEG)
Principes de Stockage
(ENSEEG-ENSIEG)
Cours/TD 52h ECTS 6

Le Master "CSEE"

Le projet intégrateur

- Objectifs :
Fournir une méthodologie générale qui permette de concevoir et de dimensionner des systèmes d'énergie électrique
- Définir les modèles nécessaires pour les composants réseau
- Réflexions autour des problèmes d'optimisation
- Mise en œuvre de différents outils logiciels pour l'analyse, la simulation, la validation

Les contraintes du réseau de bord "avion"

- Plus d'électricité :
 - Maîtriser les consommations
 - Augmenter les rendements
 - Etre fiable, sûr et maintenable
- Simplification de la transmission mécanique entre le moteur et le générateur de bord => f variable
- Prolifération des charges non linéaires => quels impacts sur le réseau, sur les générateurs et les autres charges ?
- Mesure des contraintes : normes

Les contraintes du réseau de bord "avion"

Harmoniques	Limites
3, 5 et 7	$I_3 = I_5 = I_7 = 0.02 I_1$
$n = 9, 15, 21, \dots, 39$	$I_n = 0.1 I_1 / n$
11	$I_{11} = 0.1 I_1$
13	$I_{13} = 0.08 I_1$
17 et 19	$I_{17} = I_{19} = 0.04 I_1$
23 et 25	$I_{23} = I_{25} = 0.03 I_1$
29, 31, 35 et 37	$I_n = 0.3 I_1 / n$



THD < 5%-10%

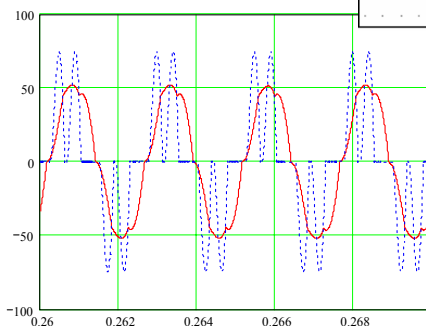
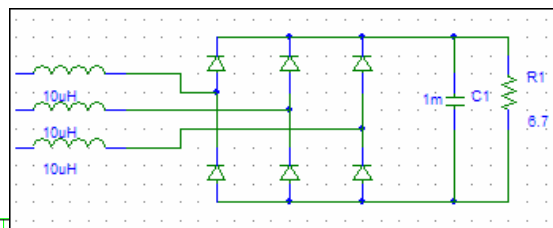
En courant

+ **Facteur de puissance**
(au sens du 1er harmonique)

$\cos \varphi > 0.95$ si $S > 600$ VA

Norme Airbus ABD0100 pour les systèmes triphasés

Etage d'entrée d'un actionneur électrique

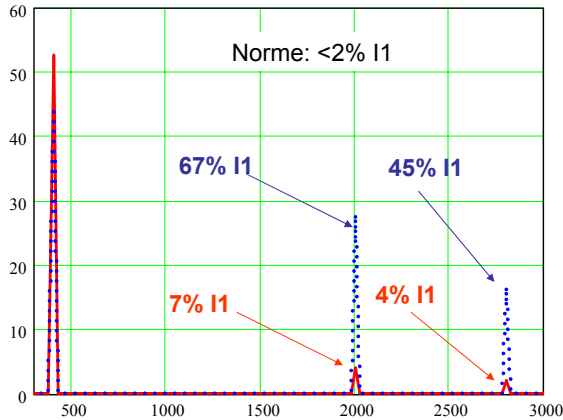


— $L = 518\mu\text{H} - R = 4.1\Omega$
- - - $L = 10\mu\text{H} - R = 6.7\Omega$

$P = 10\text{kW}$

Analyse des phénomènes

- Comparaison en terme de THD et de taux individuel



P = 10kW

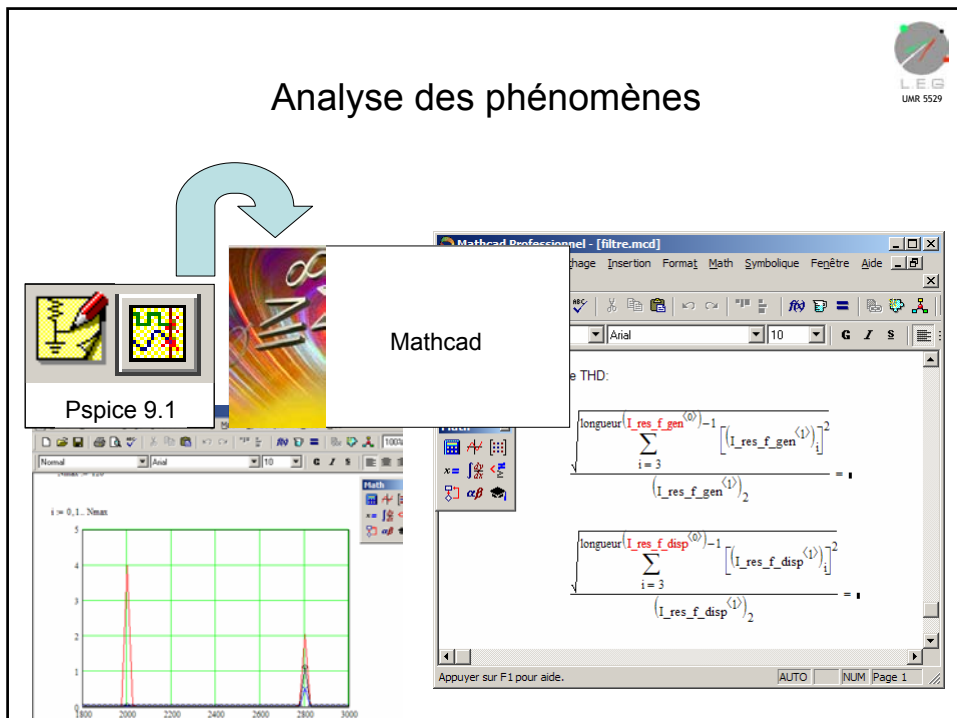
— L = 518µH – R = 4.1Ω

— L = 10µH – R = 6.7Ω

THD = 8.8%

THD = 80%

Analyse des phénomènes



Pspice 9.1

Mathcad

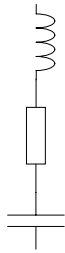
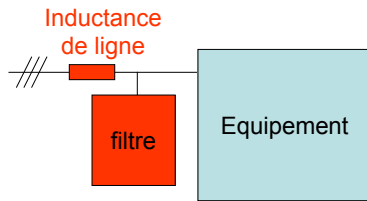
THD:

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=3}^{\text{longueur}(I_{\text{res_f_gen}}^{(0)})-1} [I_{\text{res_f_gen}}^{(i)}]^2}{(I_{\text{res_f_gen}}^{(1)})^2}} = \text{THD}$$

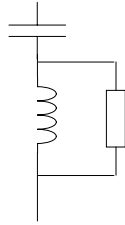
$$\sqrt{\frac{\sum_{i=3}^{\text{longueur}(I_{\text{res_f_disp}}^{(0)})-1} [I_{\text{res_f_disp}}^{(i)}]^2}{(I_{\text{res_f_disp}}^{(1)})^2}} = \text{THD}$$

Appuyer sur F1 pour aide. | AUTO | NUM | Page 1

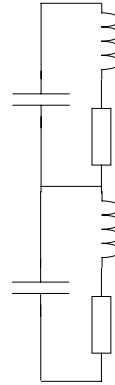
Filtrage passif



Shunt résonant

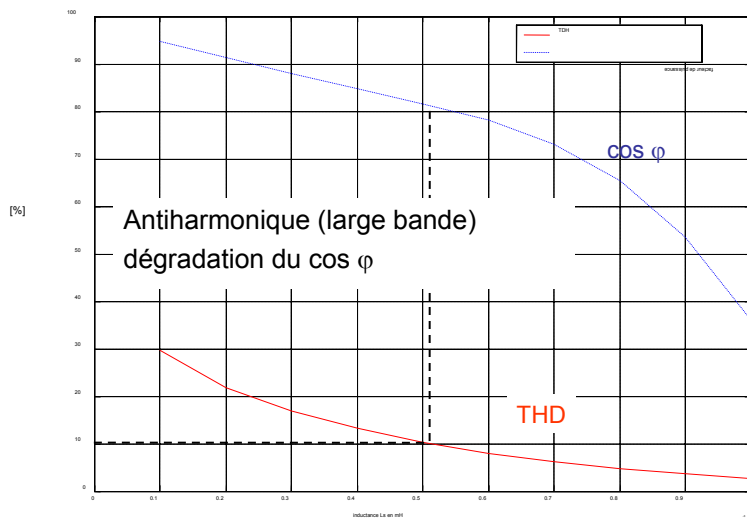


Passé Bas 2ème ordre

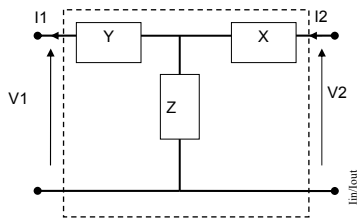


Double passe bande

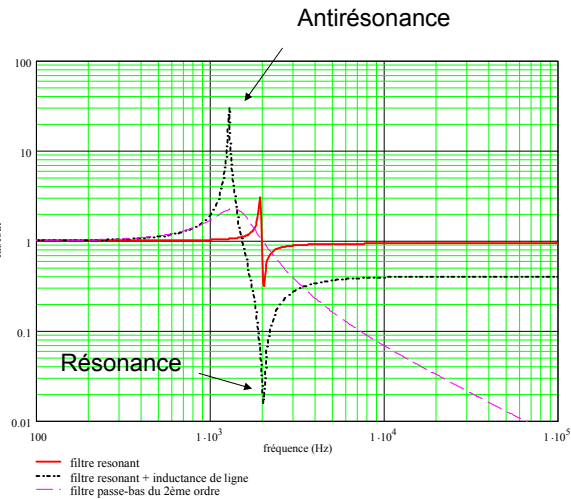
Filtrage passif: effets de l'inductance de ligne



Filtrage passif



$$\begin{bmatrix} V2 \\ I2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{Y}{Z} & -(X + Y + \frac{X \cdot Y}{Z}) \\ -\frac{1}{Z} & 1 + \frac{X}{Z} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V1 \\ I1 \end{bmatrix}$$



Dimensionnement usuel d'un filtre passif

- Ligne => $\Delta V = 10\%$ (au sens de H1)
- L*C autour de H5

- C peut être dimensionné vis-à-vis de $\cos \varphi$ $Q = 3 \cdot \frac{V^2}{XLC} = \frac{3 \cdot V^2}{\left(L_h \cdot \omega_0 - \frac{1}{C_h \cdot \omega_0} \right)} = \frac{3 \cdot V^2}{\left(\frac{\omega_0}{\omega_h^2 \cdot C_h} - \frac{1}{C_h \cdot \omega_0} \right)}$

- Choix de la fréquence d'antirésonance non multiple de 400Hz
- Attention au niveau de courant dévié au fondamental 400Hz

L_ligne	140µH
C	2.6 µF
L	2.4 mH

cos φ	0.95
I_filtre (400Hz)	2.2 % I1
F_res	2000 Hz
F_anti_res	1958 Hz

H7 ?

Est-ce le dimensionnement optimal du point de vue du volume et donc de l'encombrement ?

Stratégie de dimensionnement global

Interaction filtre - pont de diodes à inductance de ligne constante

Courant obtenu sans filtre
parallèle et avec une
inductance de ligne



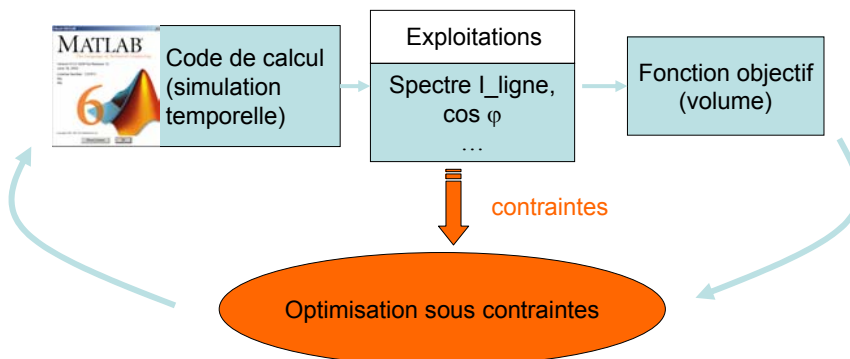
Simulation avec filtre



	Amplitude de H7 (A)
Pont de diode seul	2.04
Prévision filtrage (source de courant indépendante du filtre)	0.51
Simulation avec filtre	1.12

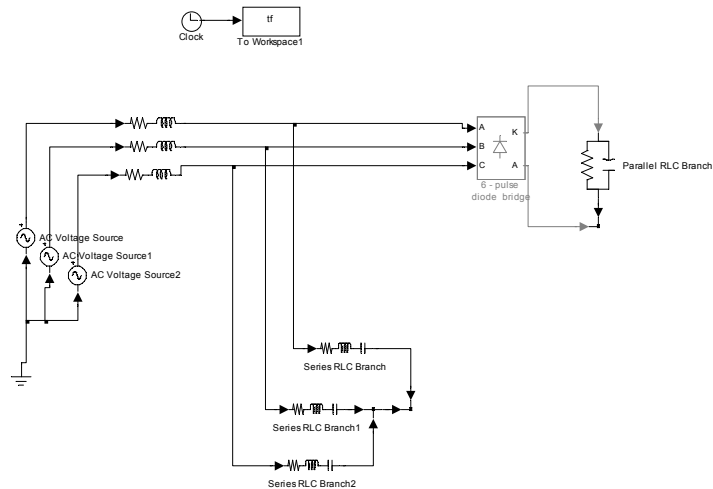
Stratégie de dimensionnement global

Le fonctionnement du redresseur dépend du filtre



Fonction de calcul

- Matlab SimPowerSystem Blockset



Fonctions d'exploitation

- Fonctions FFT et THD données (.m)

Contraintes

- Taux individuel d'harmoniques
- THD
- $\cos \varphi$ (au sens du fondamental)
- Facteur de puissance P/S
- I_{filtre}

Fonction objectif

- Calcul du volume du filtre

$$3 * \text{Vol}(\text{L_Ligne}) + 3 * \text{Vol}(\text{L}) + 3 * \text{Vol}(\text{C})$$

- Calcul du volume des condensateurs

Approximation du condensateur plan:

$$S = d \cdot C / \varepsilon$$

$$\hat{E} = V / d$$

$$\text{Vol}(\text{C}) = \frac{C}{\varepsilon} \cdot \left(\frac{V}{\hat{E}} \right)^2$$

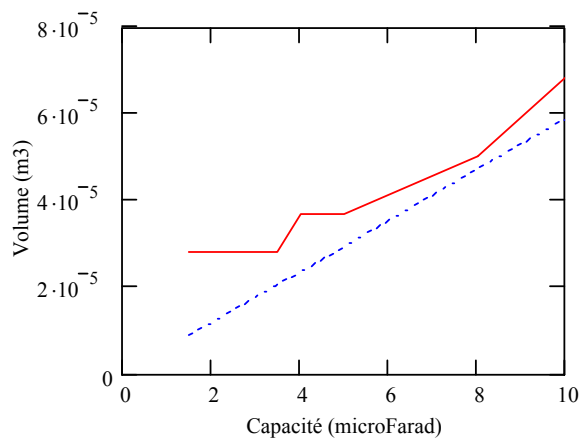
Fonction objectif

- Calcul du volume des condensateurs :
Comparaison avec datasheet constructeur (400V – 50Hz)

$$V := 325$$

$$\hat{E} := 45 \cdot 10^6$$

$$\varepsilon := \frac{1}{36 \cdot \pi} \cdot 10^{-9}$$

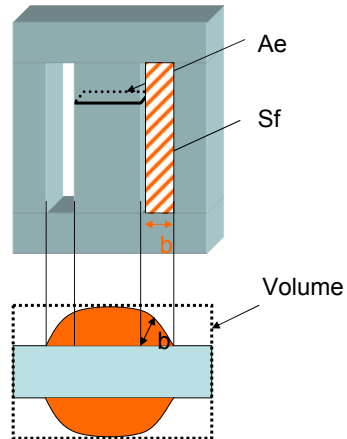


Fonction objectif



- Calcul du volume des inductances :

- Dimensionnement d'une inductance par le produit des aires ($A_e \cdot S_f$) => $A_e \cdot S_f = f(L, \hat{I}, I_{eff})$



- En fonction du noyau choisi, lien entre le volume de l'inductance et $A_e \cdot S_f$: $Vol(L) = K \cdot (A_e \cdot S_f)^{3/4}$

- Pour noyau E: $K = 18.9$

- Pour noyau U+l: $K = 19.2$

$K = 20$ (ordre de grandeur)

Optimisation sous contraintes

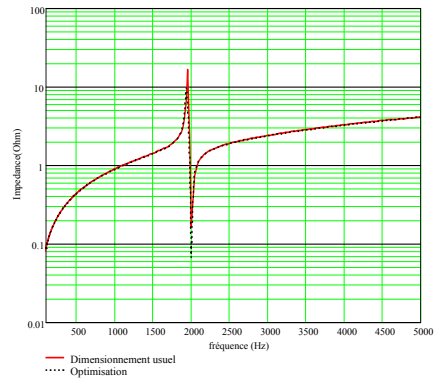


- Contraintes : $\cos \varphi > 0.95$; THD < 10 %
- Point de départ: dimensionnement usuel sur $L \cdot C$; L_{ligne} variable
- Temps de simulation: entre 20 et 40 min (dépend du point de départ)
- Résultat pour 10kW:
 - $L_{\text{ligne}} = 138 \mu\text{H}$
 - $L = 2.4 \text{mH}$
 - $C = 2.5 \mu\text{F}$
 - Volume = 694cm^3

Comparaison optimisation – méthode usuelle



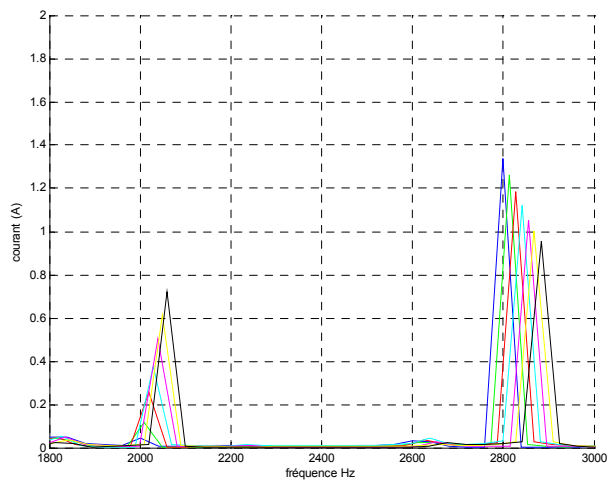
	Dimensionnement usuel	Optimisation
		10kW
L _{ligne} (μH)	140	138
C (en μF)	2.58	2.5
L (en μH)	2445	2440
I _{h5} (en % de I _l)	1.8	1.94
I _{h7} (en % de I _l)	9.5	9.2
TDH (en %)	10.5	10.5
FP	0.97	0.97
Volume total en cm ³	696	694



Etude de sensibilité

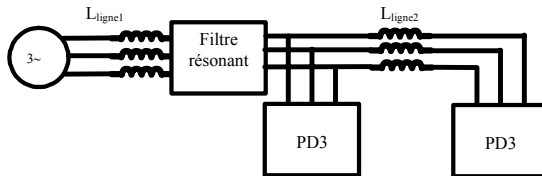


Variation de la fréquence du réseau (400-415)

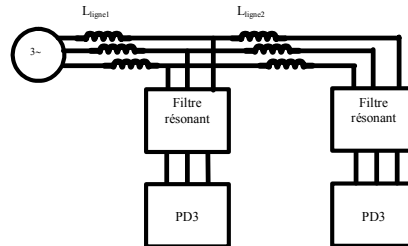


Association de redresseurs

Le filtre "optimal" n'a pas un volume linéaire avec la puissance



Config. 2 : un filtre global



Config. 1 : un filtre par pont

	Config 1	Config 2
TDH en %	3.72	4.99
FP	0.94	0.95
Volume en cm ³	1546	851

Conclusion

- Projet intégrateur
- Module harmonique :
 - Sensibilité du redresseur sur capacité à l'impédance de ligne
 - Définitions
 - Dimensionnement usuel
 - Stratégie d'optimisation
 - Filtrage de plusieurs convertisseurs
- Nombreux logiciels
 - Spice, Matlab, Mathcad, Saber (validation finale)
- Et le filtrage actif ?

Planning

<i>Séance (durée)</i>	<i>Thème</i>	<i>Cours</i>	<i>Point bilan</i>
1 (2h)	Présentation	2h00	
2 (4h)	Simulation Spice	0h30	
3 (4h)	Filtre (Mathcad)	0h30	
4 (4h)	Association filtre-CVS (Spice)	0h30	0h15
5 (4h)	Simulation Matlab: comparaison avec PSpice	0h30	
6 (4h)	Codage des volumes et fonction "fmincon" d'optimisation sous Matlab	1h00	0h30
7 (4h)	Mini réseau		0h15