

ABE2808 POST-PETROLEUM Moteur Synchrone

Poste 1 Etude 2D axisymétrique à une bobine

22 May, 2015

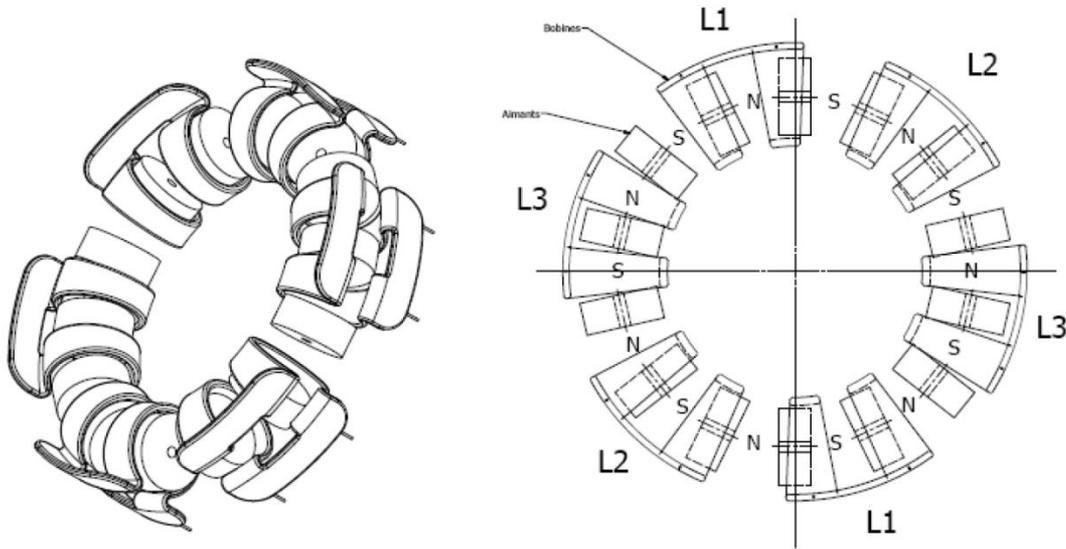
Sommaire

- Contexte du Projet
- Présentation de la machine synchrone à aimants permanents
- Présentation du Poste 1
- Présentation du modèle 2D axisymétrique
- Simulations - Tensions induites ou BEMF
- Simulations - Force
- Simulations – Inductance
- Résistance des bobines
- Proposition de définition des bobines
- Proposition des lois de commande (commutations) des bobines

Contexte du Projet

- La société POST PETROLEUM souhaite développer une nouvelle machine synchrone, ce qui passe par la réalisation d'un prototype. Cette machine est innovante à différents titres, notamment à cause de « bobines ouvertes ». Avant de lancer la réalisation d'un prototype, POST PETROLEUM souhaite approfondir la conception des bobines et des lois de commandes associées. Elle consulte CEDRAT TECHNOLOGIES pour l'aider à cette définition.

Présentation de la machine synchrone à aimants permanents



Structure magnétique du moteur synchrone 12/14 de POST PETROLEUM à bobines ouvertes

Présentation de la machine synchrone à aimants permanents

- Cette machine synchrone est particulière par la forme des bobines employées ainsi que l'absence de circuits magnétiques au stator et au rotor, on parle alors de machine air-cored ou coreless. C'est une machine à 6 bobines (équivalents à 12 encoches en machines radiales) et 14 aimants de type NdFeB.
- Ce type de machine peut être modélisé rigoureusement par un modèle 3D. Dans ce poste 1 on traite de la modélisation 2D de une paire de bobines représentant une bobine du dispositif réel et d'un nombre de paires d'aimants afin d'étudier les tensions induites, la force tangentielle ainsi que l'impédance électrique des bobines.

Présentation du poste 1

- La machine synchrone à aimants permanents est linéarisée suivant la direction circonférentielle en représentant une paire de bobines et des aimants cylindriques. On analyse dans ce poste 1 le comportement magnétique de la machine sans circuit magnétique.

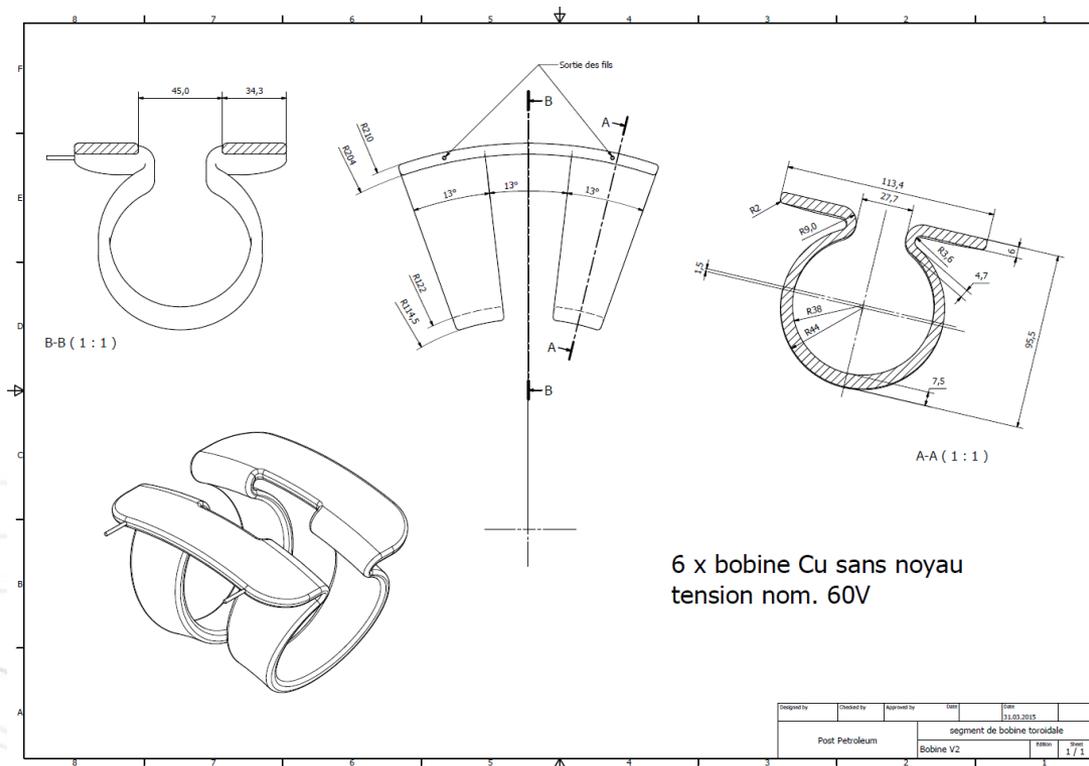
Présentation du Poste 1 – hypothèses et compréhension des travaux

- Les travaux réalisés au Poste 1 sont basés sur une modélisation Eléments Finis 2D Electromagnétique axisymétrique. La machine étant rigoureusement et idéalement modélisée et simulée en 3D, les résultats des simulations sont principalement analysés et exploités pour analyser le comportement magnétique et servent de première approche aux futurs travaux de modélisation en 3D. Tous les travaux et résultats sont donc à considérer pour une machine linéaire synchrone et sa représentation 2D.

Présentation du modèle 2D axisymétrique

Les dimensions des bobines sont définies via les plans fournis:

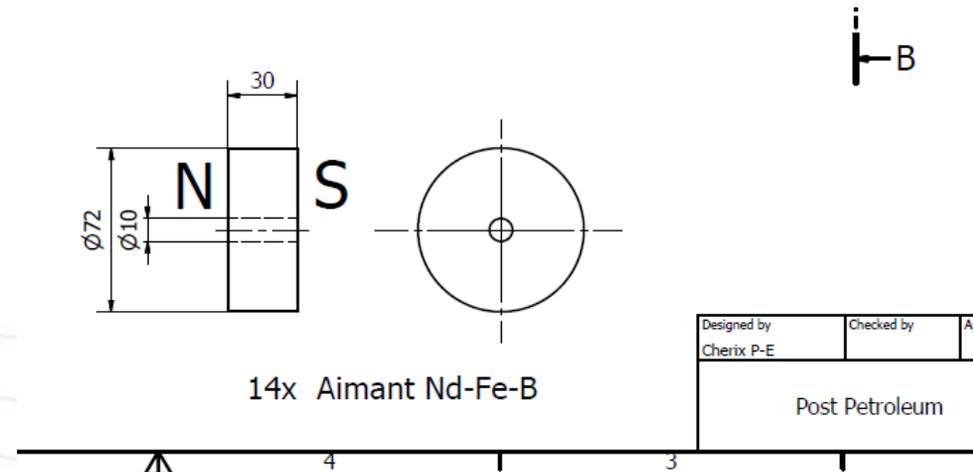
- Bobines cylindriques OD88 x ID76 x H31.1



Présentation du modèle 2D axisymétrique

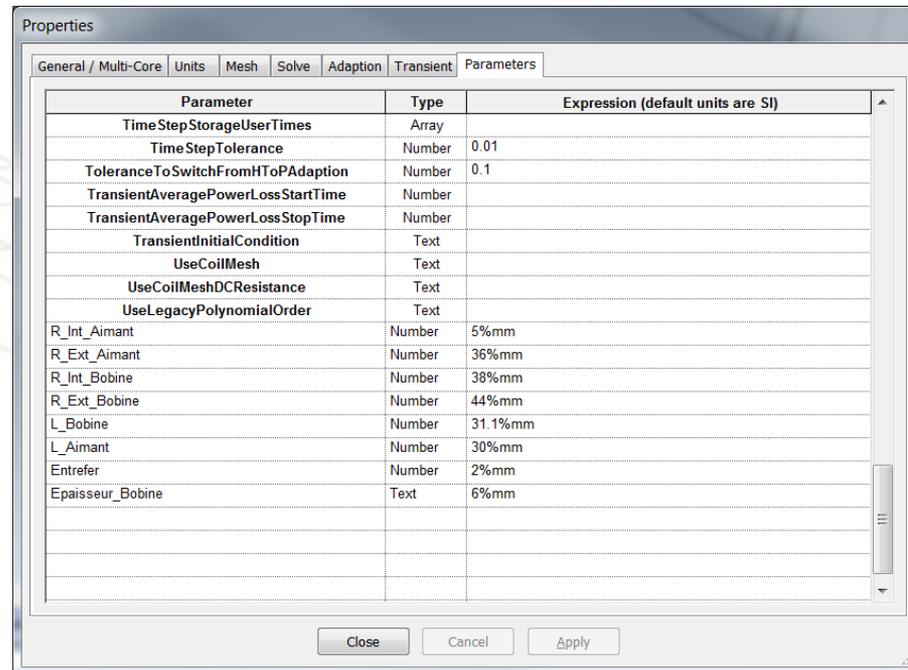
□ Les dimensions des aimants sont définies via les plans fournis :

- Aimants cylindriques
OD72 x ID10 x H30



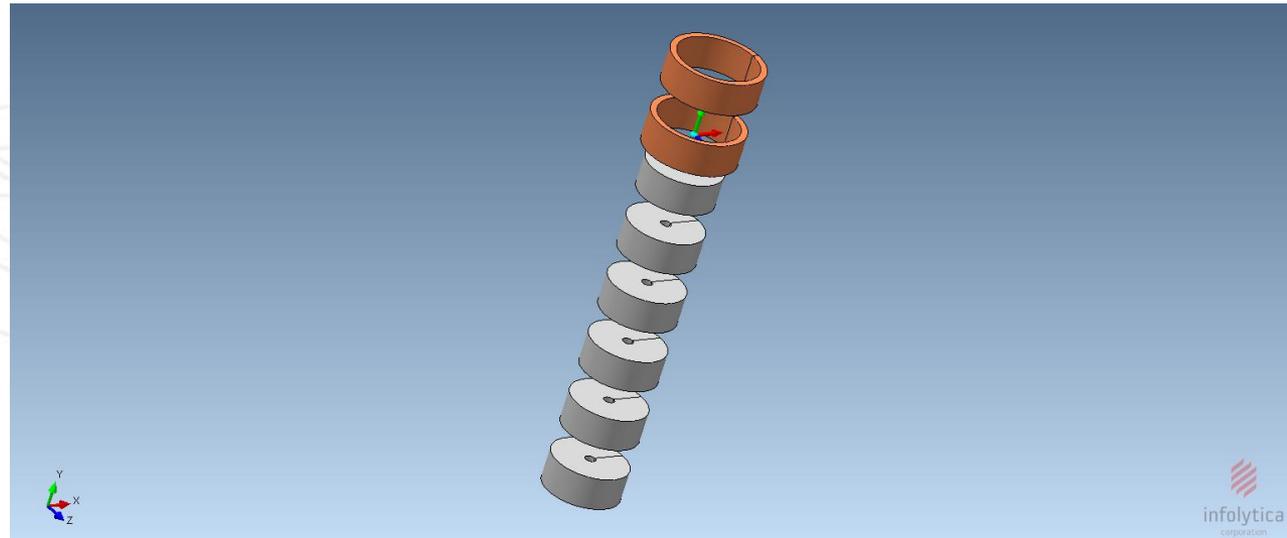
Présentation du modèle 2D axisymétrique

- Dans le cas de futurs travaux avec des dimensions différentes le modèle a été paramétré au niveau de la géométrie.



Présentation du modèle 2D axisymétrique - Géométrie

- Les volumes d'air ne sont pas visibles sur cette géométrie (vue 3D pour la compréhension, le modèle étant 2D). On observe deux bobines et 6 aimants et on considère une translation suivant l'axe Y (en vert).



Bobinage

- On considère des bobines à 1 spire pour déterminer la tension induite à vitesse donnée par spire. On observe que les bobines sont orientées à direction opposée pour représenter une bobine du dispositif réel. Le matériau utilisé pour les bobines est du cuivre à résistivité 1.724×10^{-8} Ohms.m à 20°C.



Aimants

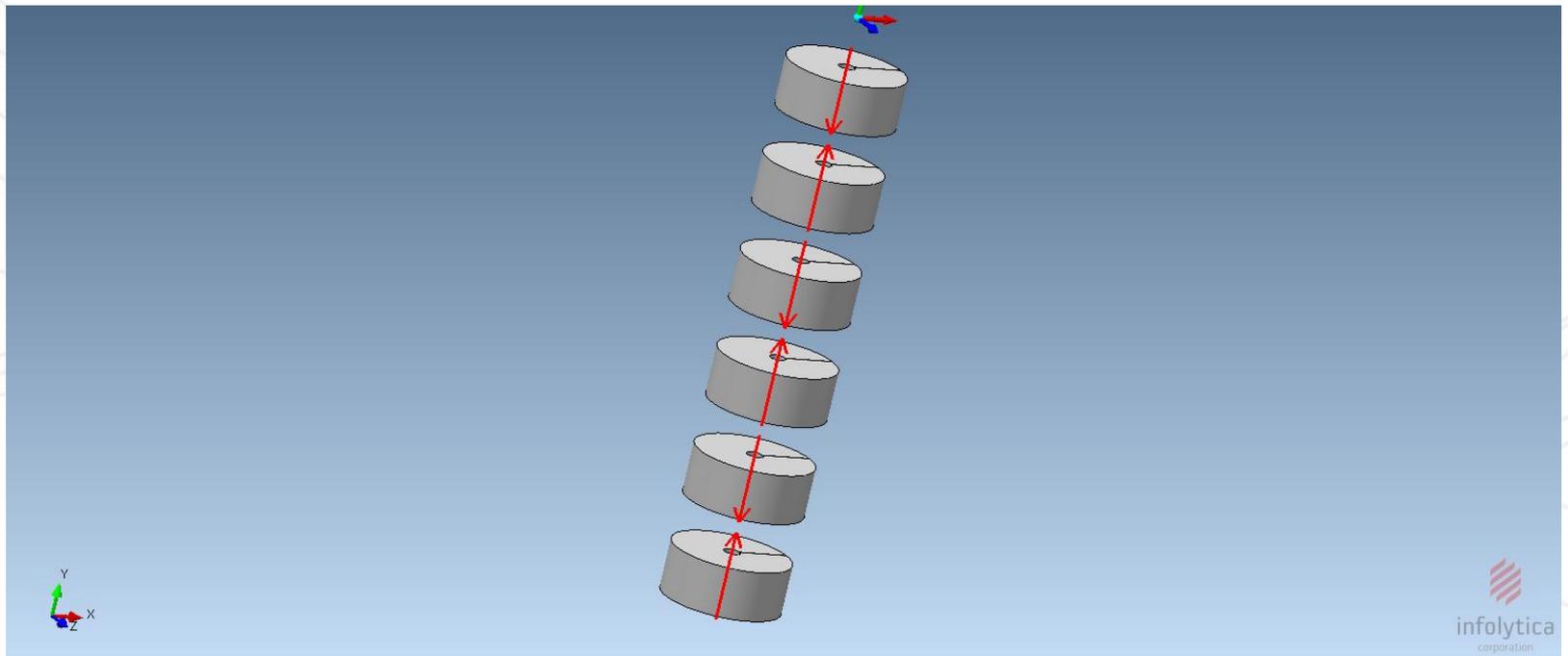
- Les aimants sont des aimants de type terres-rares NdFeB de grade N52. On utilise pour la modélisation les propriétés magnétiques de l'aimant VACODYM 722HR de chez Vacuumschmelze. Les aimants de ce grade ont **une température de fonctionnement max très basse, 50°C** et il est important de le souligner, des **problèmes de démagnétisation** pouvant intervenir. De même la coercivité est faible.

Material	Code ¹⁾	See Page	Remanence				Coercivity	
			B _r typ. Tesla	B _r typ. kG	B _r min. Tesla	B _r min. kG	H _{CB} typ. kA/m	H _{CB} typ. kOe
VACODYM 722 HR	380/87.5	15	1.47	14.7	1.42	14.2	915	11.5

H _{CB} min. kA/m kOe				H _{CJ} min. kA/m kOe				Energy density				Temperature coefficient		Density ρ typ. g/cm ³	Max. cont.-temperature T _{max} ²⁾	
								(BH) _{max} typ. kJ/m ³ MGOe		(BH) _{max} min. kJ/m ³ MGOe		20-100 °C			20-150 °C	
kJ/m ³		MGOe		kJ/m ³		MGOe		TC (B _r) typ. %/°C	TC (H _{CJ}) typ. %/°C	TC (B _r) typ. %/°C	TC (H _{CJ}) typ. %/°C	°C	°F			
835	10.5	875	11	415	53	380	48	-0.115	-0.77			7.6	50	120		

Aimants – Direction magnétisation

- On observe l'alternance de pôles Nord et Sud des aimants via un vecteur de direction de magnétisation.



Conditions de simulations

- Tous les travaux ont été réalisés pour une température de 20°C, les performances de la machine varient avec la température et l'influence de la température est présentée dans les résultats.

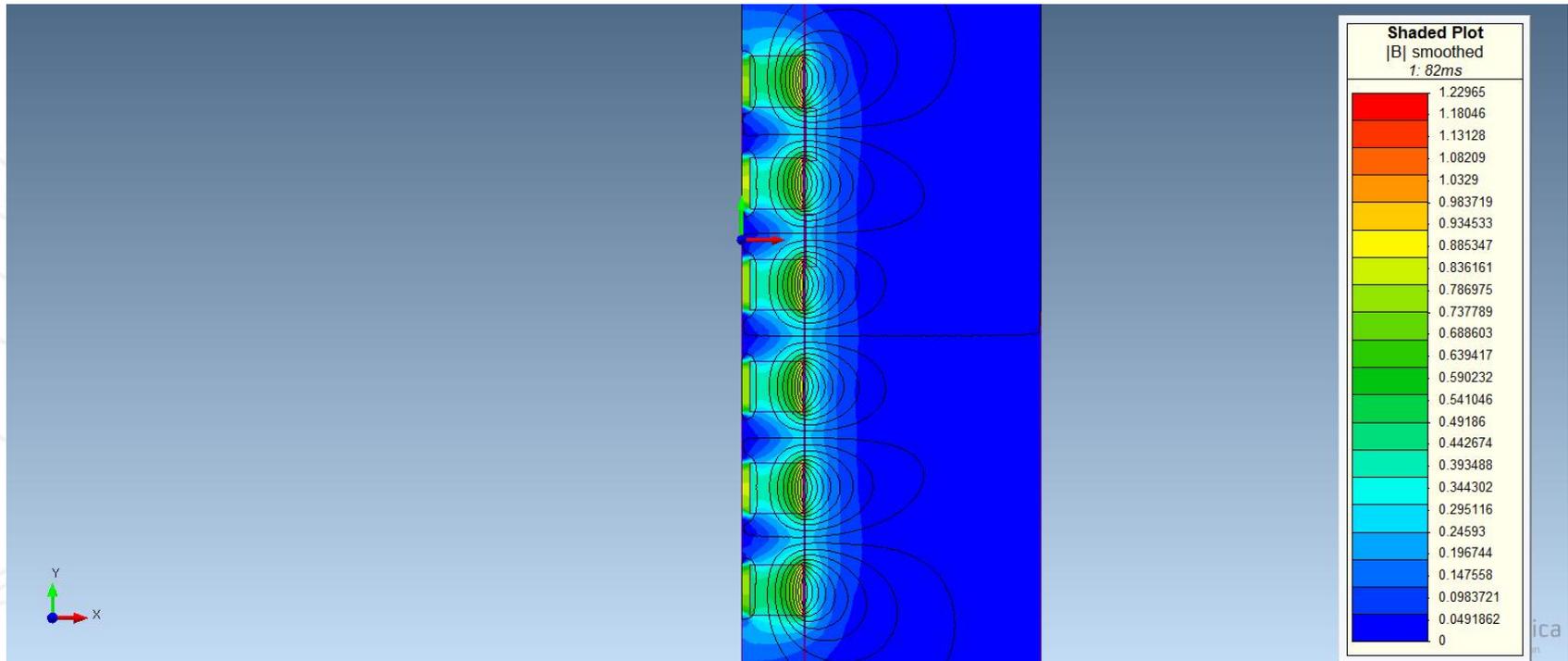
Simulations – Tensions Induites

- Pour déterminer les tensions induites il est nécessaire de définir une vitesse de fonctionnement. Les tensions induites étant proportionnelles à la vitesse on peut choisir comme référence une vitesse de **100 rpm** soit une vitesse linéaire de **1.69 m/s** en considérant un rayon moyen de la machine tournante égal à **161.5 mm**. Les tensions induites sont des tensions à vide, les courants circulant dans les bobines étant nuls.

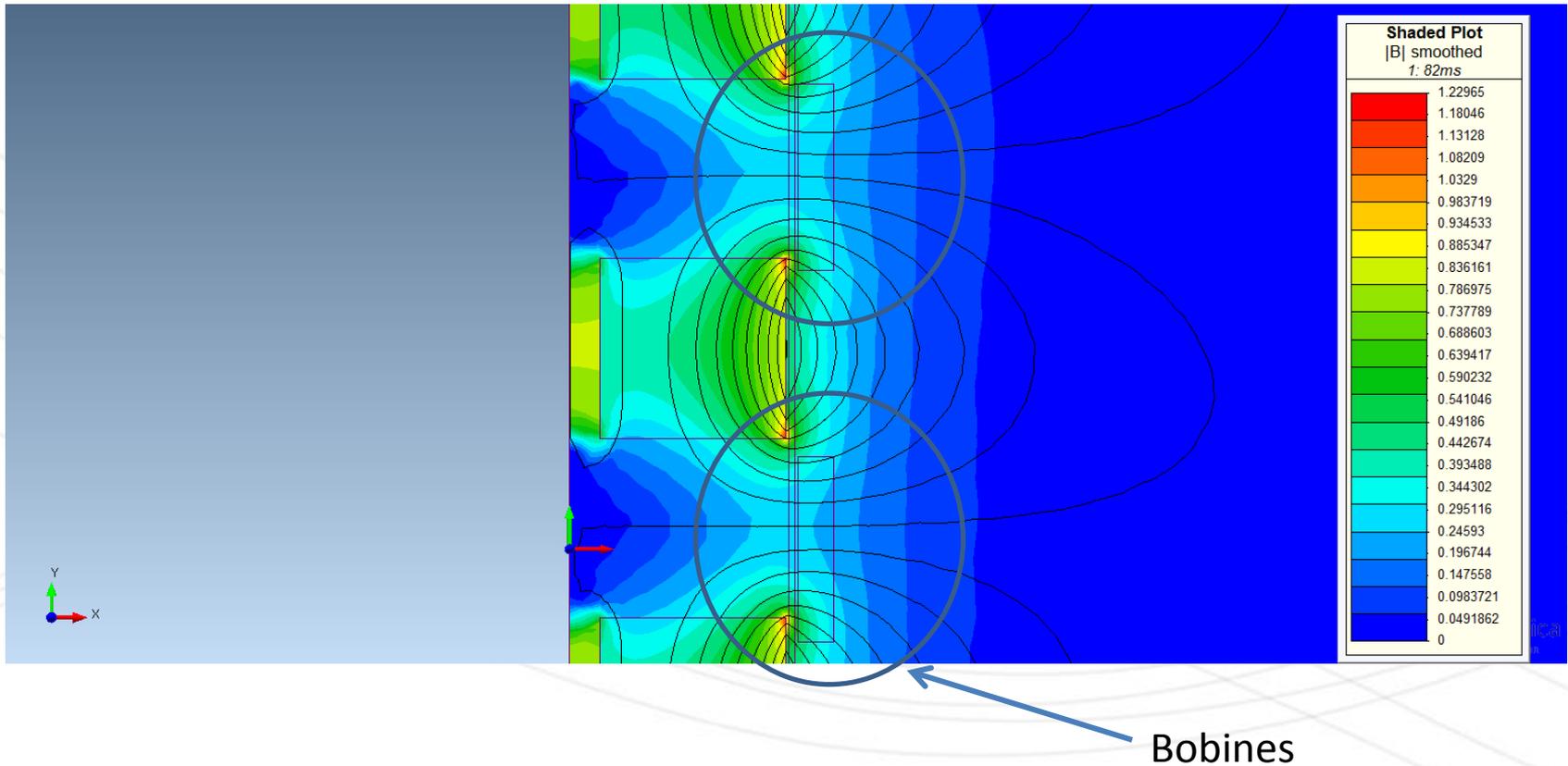
Simulations – Tensions Induites

- ❑ A cette vitesse linéaire avec des longueurs d'aimants de 30 mm on considère une période électrique de 71 ms soit une fréquence électrique de 14Hz.
- ❑ On représente ci-après une distribution de densité de flux et les courbes tensions induites.
- ❑ Les calculs ont été réalisés pour une température de 20°C.

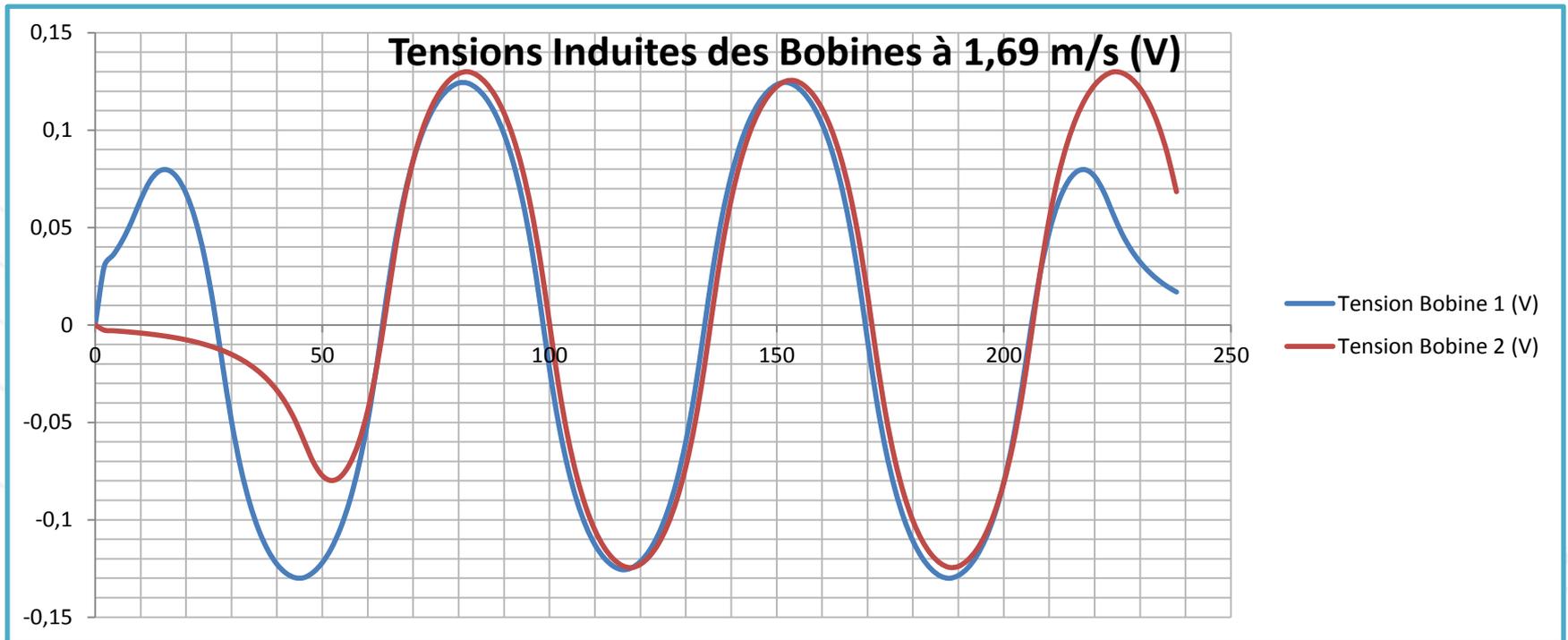
Simulations – Tensions Induites – Distribution de densité de flux (T)



Simulations – Tensions Induites – Distribution de densité de flux (T)

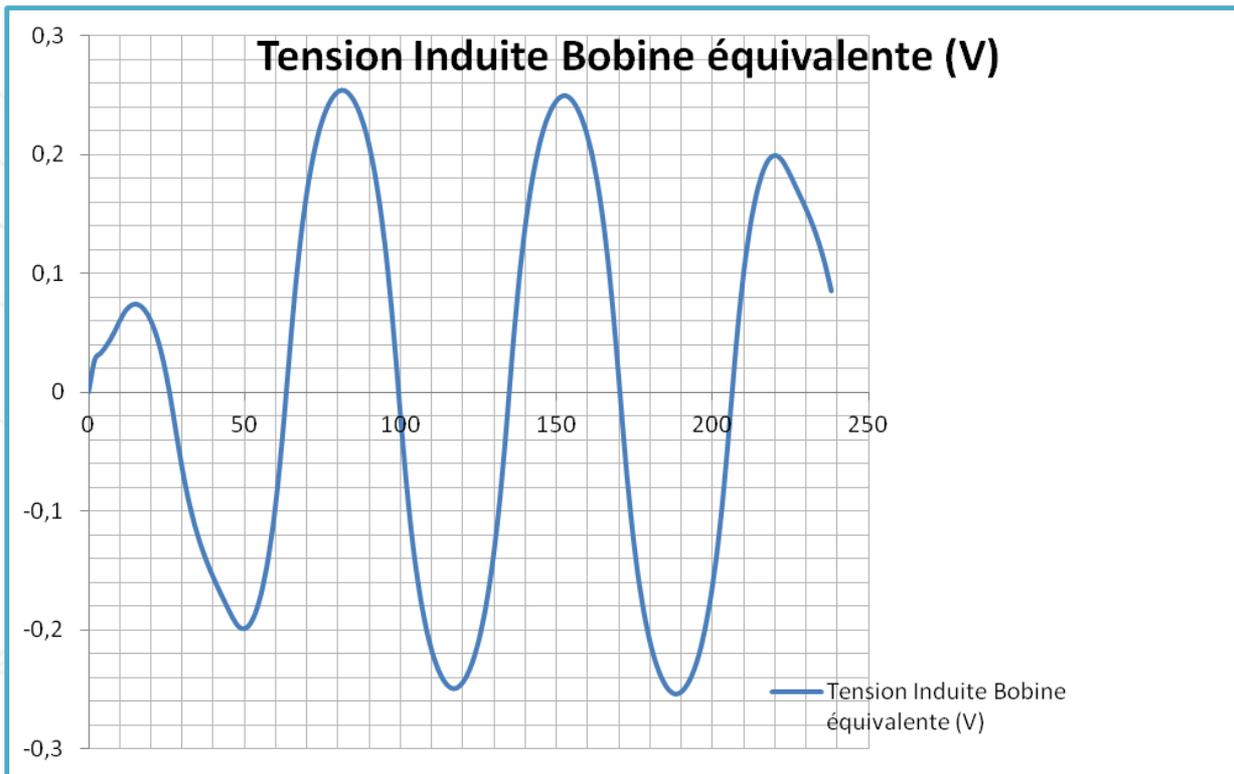


Simulations – Tensions Induites



On observe un léger déphasage entre les bobines qui est dû à la différence de longueurs entre les bobines (31.1 mm) et les aimants (30 mm). Chaque bobine a une tension induite équivalente de fréquence électrique 14hz.

Simulations – Tensions Induites de la bobine équivalente de la machine (deux bobines du modèle 2D en série)



□ On a une tension induite pour une vitesse de 1.69 m/s de **0.25V** peak par bobine pour une spire et un aimant de Br égal à 1.44T.

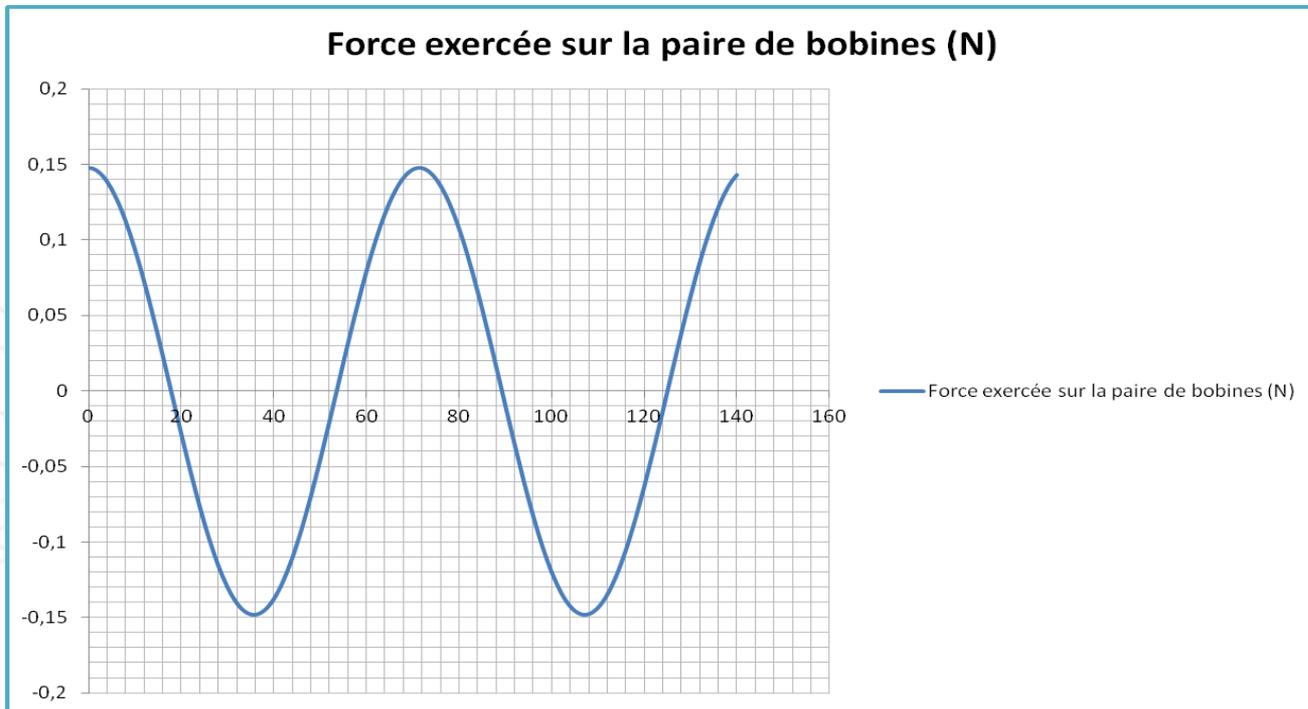
Simulations – Tensions Induites

- Il est important de savoir que les tensions induites :
 - Sont proportionnelles à la vitesse de translation
 - Sont proportionnelles au nombre de spires en séries par bobine
 - Sont proportionnelles à l'induction rémanente de l'aimant B_r qui est dépendante de la température avec un coefficient de température de $-0.12\%/^{\circ}\text{C}$ pour cet aimant

Simulations - Force

- ❑ Afin de calculer la force tangentielle de la machine linéaire à aimants permanents on va déterminer sa caractéristique angle interne. En effet, il est possible de tracer en fonction de la phase la force du dispositif synchrone. La partie mobile est fixe et on considère un courant sinusoïdal de fréquence 14hz dans les bobines.
- ❑ Pour un courant unitaire 1A on peut déterminer ainsi la force maximale (et en équivalence le couple maximum) de la machine synchrone à aimants permanents lorsqu'elle est bien synchronisée, c'est-à-dire lorsque la tension induite aux bornes d'une bobine est en phase avec le courant y circulant.
- ❑ On impose alors un courant sinusoïdal aux bornes des deux bobines, ce courant étant identique, seules les bobines sont orientées de manière opposée.

Simulations – Force 1 A 1 spire par bobine

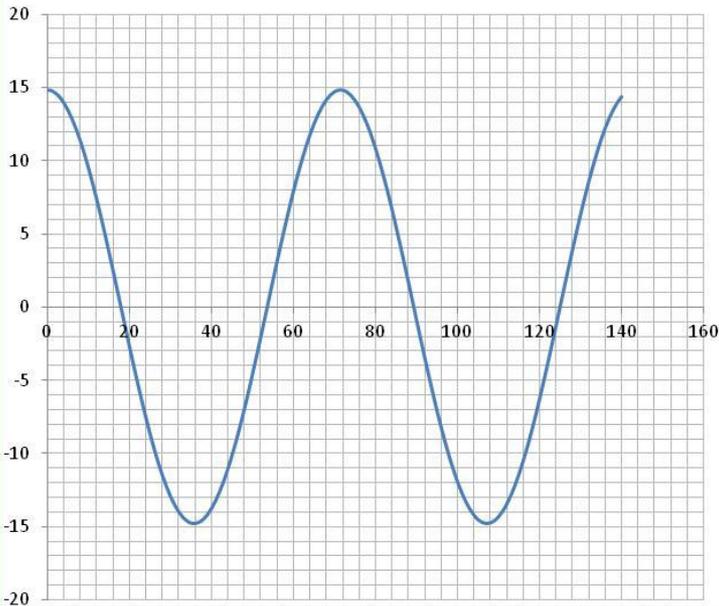


Simulations – Force 1 A 1 spire par bobine

- ❑ La force du dispositif pour les bobines de 1 spire parcourues par un courant de 1A est **0.148 N**. On peut alors considérer une constante de force de **0.148N/A**.
- ❑ Dans les machine synchrones la constante de force est égale à la constante de bemf ou constante de tension induite.
- ❑ En effet, on retrouve la constante de tension induite de **0.148V.s/m**. Pour rappel à **1.69 m/s** on a une tension induite de **0.25V**.

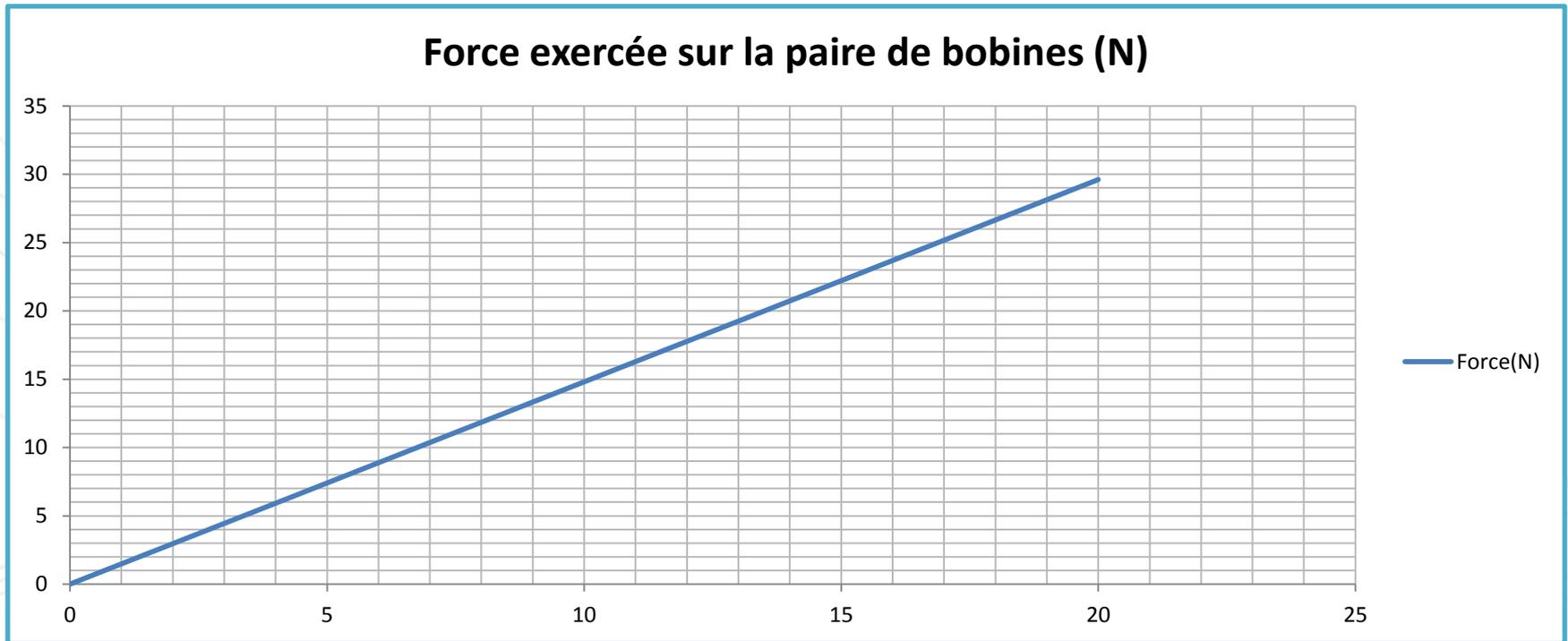
Simulations – Force 10 A 10 spires par bobine

Force exercée sur la paire de bobines (N)



□ La force pour un courant de 10A et 10 spires est de environ 15N.

Simulations - Force vs courant – Bobines à 10 spires



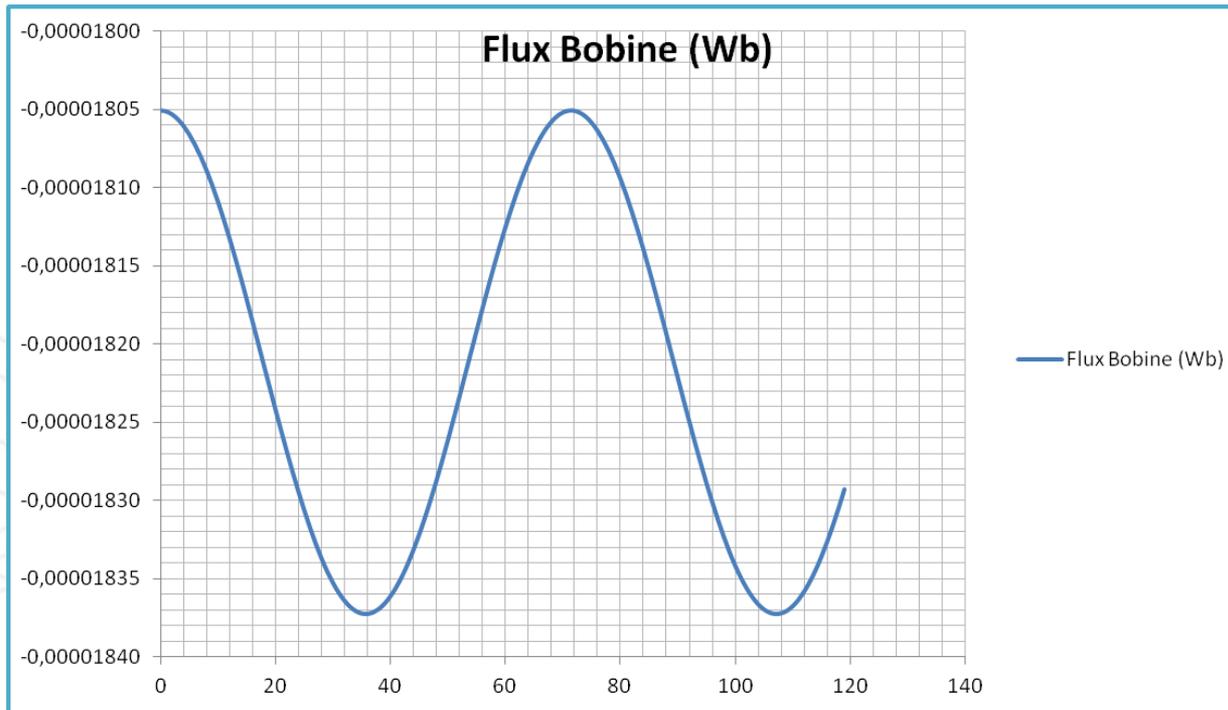
Simulations - Force

- ❑ La force est proportionnelle au courant et au nombre de spires dans un cas de circuit magnétique non saturée. Dans ce poste 1 on ne considère pas de circuit magnétique, il n'y a donc pas de phénomène de saturation d'où la linéarité de la force en fonction du courant et du nombre de spires. Cependant la densité de courant dans la bobine en fonction du nombre de spires et du courant est à prendre en compte pour ne pas être confronté à des problèmes d'échauffements. Par expérience et pour le besoin de définition de la bobine on considère une densité de courant RMS de $5\text{A}/\text{mm}^2$.
- ❑ Pour 10 spires et 10 A on a bien une force 100 fois supérieure à la force de 1A et 1spire.

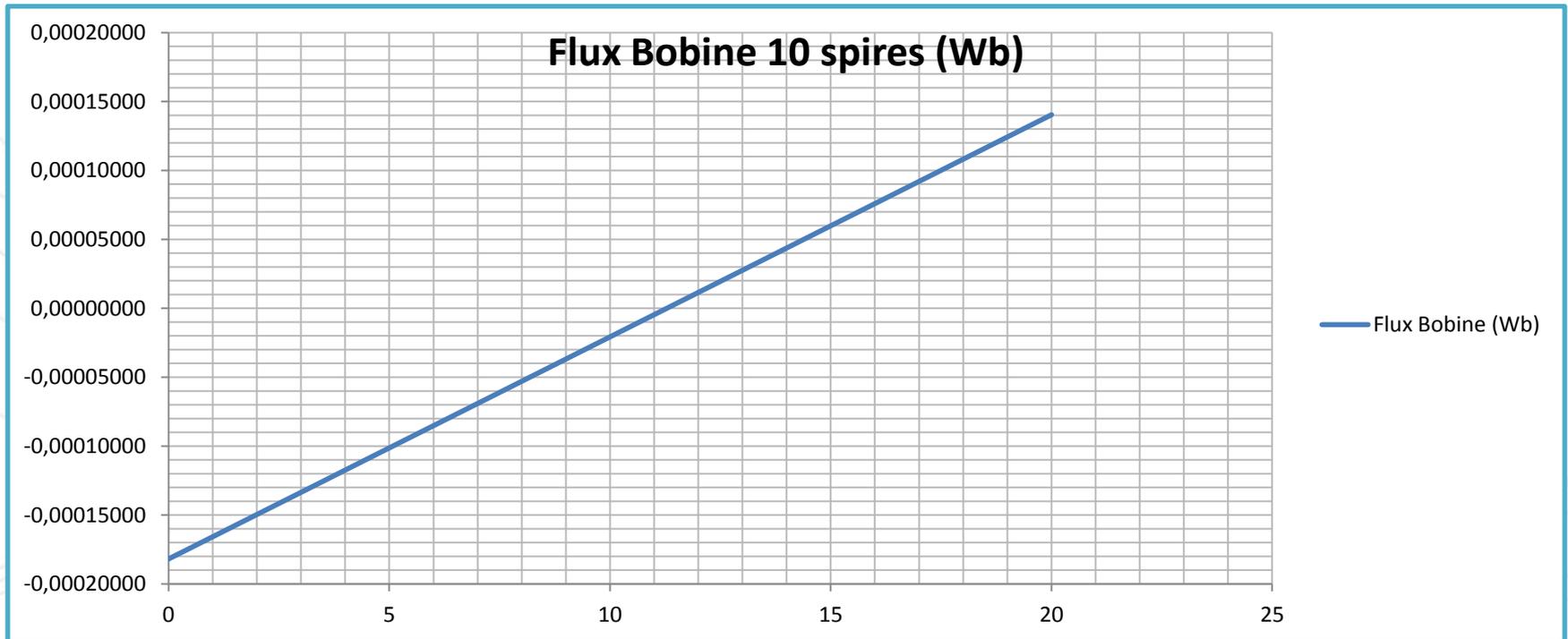
Simulations - Inductance

- ❑ Le calcul d'inductance est réalisé dans un premier temps pour une spire et 1A par bobine.
- ❑ Dans un second calcul on considère un courant de 1A à 20A pour 10 spires par bobine.
- ❑ On détermine l'inductance via le flux de la bobine.
- ❑ Il est à noter que l'inductance est proportionnelle au carré du nombre de spires.
- ❑ On dérive le flux en fonction du courant pour obtenir l'inductance, ceci en fonction de la position.

Simulations – Flux Bobine – 1 A 1 spire par bobine



Simulations – Flux – vs Courant - 10 spires par bobine



Simulations - Inductance

- Pour déterminer l'inductance on considère la pente de la courbe du flux en fonction du courant. Dans le cas du dispositif sans circuit magnétique l'inductance n'a pas de variation sur sa valeur, la saturation n'étant pas considérée. On obtient alors une valeur constante de l'inductance de l'ordre de **$1.611 \times 10^{-7} \text{H}$** pour 1 spire et **$1.611 \times 10^{-5} \text{H}$** pour 10 spires (100 fois supérieure).

Résistance des bobines

- ❑ Pour le calcul de la résistance on considère la section de bobine fournie de **186.6 mm²** (6 mm x 31.1 mm).
- ❑ En considérant un coefficient de remplissage de **70%**, on détermine la résistance par bobine en fonction de la section cuivre, le nombre de spires, la longueur moyenne d'une spire et la résistivité (1.724×10^{-8} Ohms.m).

Résistance des bobines

- ❑ Le rayon moyen de la bobine est 41 mm. On obtient comme résistance pour 1 spire 3.411×10^{-5} Ohms.
- ❑ La résistance évolue au carré du nombre de spires. Pour une bobine de 10 spires on obtient une résistance de **3.411×10^{-3} Ohms**.
- ❑ Pour la bobine de la machine réelle on a alors une résistance de **6.822×10^{-3} Ohms pour 10 spires**.

Proposition de définition des bobines

□ La tension aux bornes des bobines est définie par la formule suivante :

□ En considérant une vitesse de 1.69 m/s avec **160 spires par bobine soit 320 spires pour la bobine équivalente** on a une tension aux bornes de la bobine de **57.6V**. Ces valeurs sont données pour le point de fonctionnement à 1.69 m/s de la machine linéaire.

Température	$T_{\text{bob}} = 20$ en °C
Coeff de température	$a_{\text{Cu}} = \frac{0,393}{100}$
Résistance à 20°C	$R_{20} = 0,0068 \text{ ohm}$
Nombre de spires bobine	$N = 10$
Inductance de l'actionneur	$L_{\text{bob}} = (0,00001611) \text{ H}$
Constante de back-emf	$K_V = 1,48 \frac{\text{V}}{\text{m s}^{-1}}$
Vitesse linéaire crête	$v_0 = 1,69 \text{ m s}^{-1}$
Résistance à la température Tbob	$R_{\text{bob}} = R_{20} (1 + a_{\text{Cu}} (T_{\text{bob}} - 20)) = 0,0068 \Omega$
Courant nominal	$I = 10 \text{ A}$
Fréquence	$f = 14 \text{ Hz}$
Soit x le facteur multiplicatif du nombre de spires	
$x = 16$	
$U_1(x) = 1 \left[\left(x^2 \cdot R_{\text{bob}} \cdot I + 1 \cdot x \cdot K_V \cdot v_0 \right)^2 + 1 \cdot \left(\left(L_{\text{bob}} \cdot x^2 \right)^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot I \right)^2 \right] U_1(x) = 57,5417 \text{ V}$	

Performances pour la définition de la bobine

- Avec la définition de la bobine précédente on peut considérer que le dispositif peut produire une force de **237N** avec **160 spires** par bobine et un courant de **10A peak**. Il est à noter que dans le cas de ce point de fonctionnement la densité de courant est de $12\text{A}/\text{mm}^2$.

Proposition des lois de commande (commutations) des bobines

- En s'appuyant sur les tensions induites et en particulier leur forme sinusoïdale on propose de considérer une commande triphasée sinus de la machine synchrone à aimants permanents, de fréquence égale à la fréquence électrique soit 14Hz.