

ABE2808 POST-PETROLEUM Moteur Synchrone

Poste 1b Etude d'une configuration à circuit magnétique

22 May, 2015

Sommaire

- ☐ Présentation du Poste 1b
- ☐ Présentation du modèle 2D axisymétrique
- ☐ Simulations - Tensions induites ou BEMF
- ☐ Simulations - Force
- ☐ Simulations – Inductance
- ☐ Proposition de définition des bobines

Présentation du poste 1b

- 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 1b le comportement magnétique de la machine avec un circuit magnétique. La présence d'un circuit magnétique implique la prise en compte de la saturation magnétique et de ce fait d'une loi non linéaire de perméabilité magnétique.

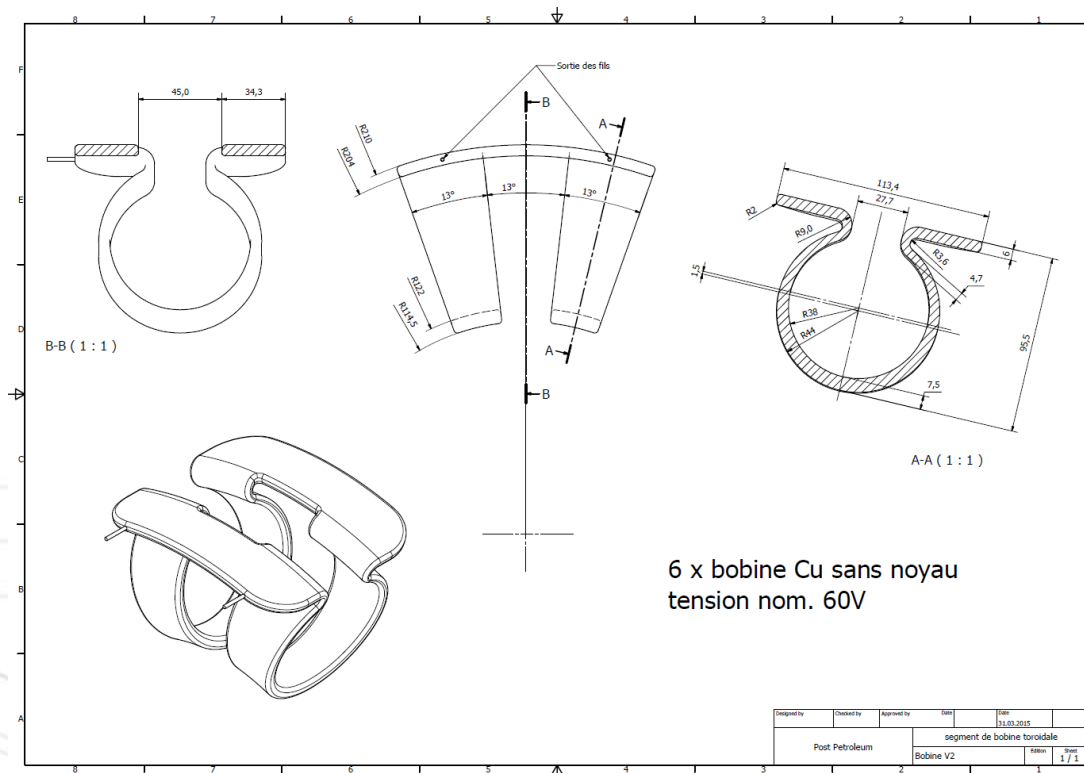
Présentation du Poste 1b – hypothèses et compréhension des travaux

- Les travaux réalisés au Poste 1b sont basés sur la modélisation Eléments Finis 2D Electromagnétique axisymétrique du Poste 1 en y ajoutant un circuit magnétique ou culasse magnétique au stator. 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.

Présentation du modèle 2D axisymétrique

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

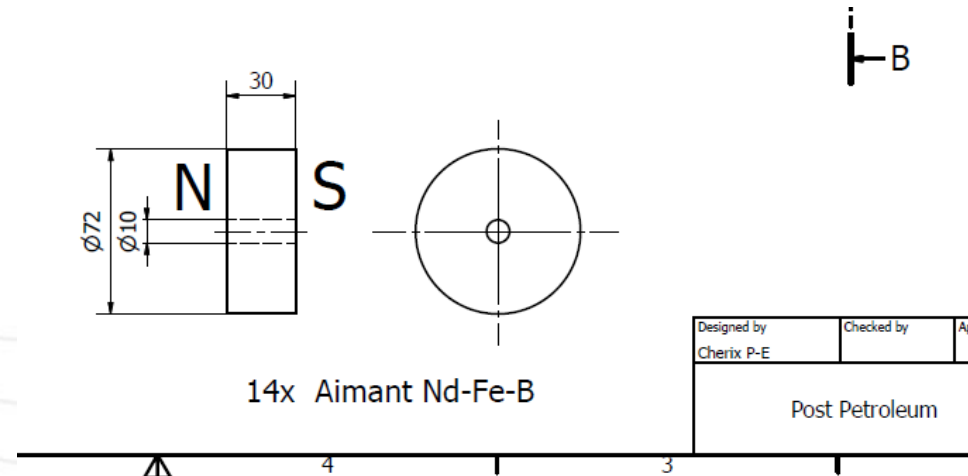
- Bobines cylindriques OD88 x ID76 x H31.1



Présentation du modèle 2D axisymétrique

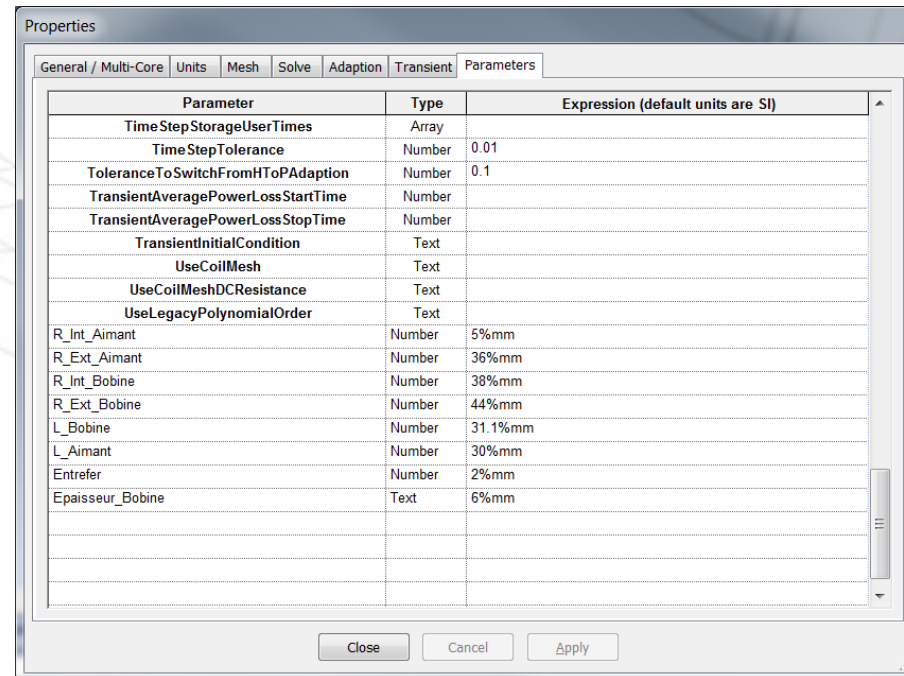
 Les dimensions des aimants sont définies via les plans fournis :

- Aimants cylindriques
OD72 x ID10 x H30



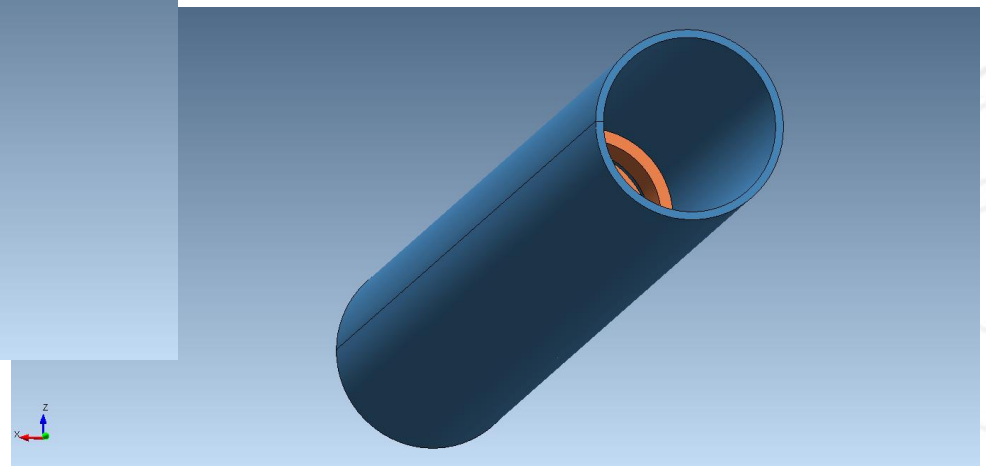
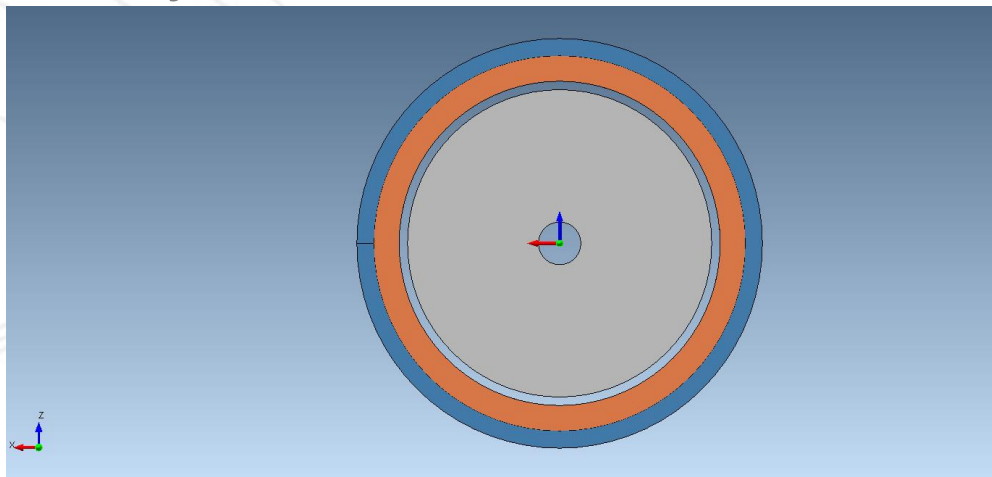
Présentation du modèle 2D axisymétrique

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



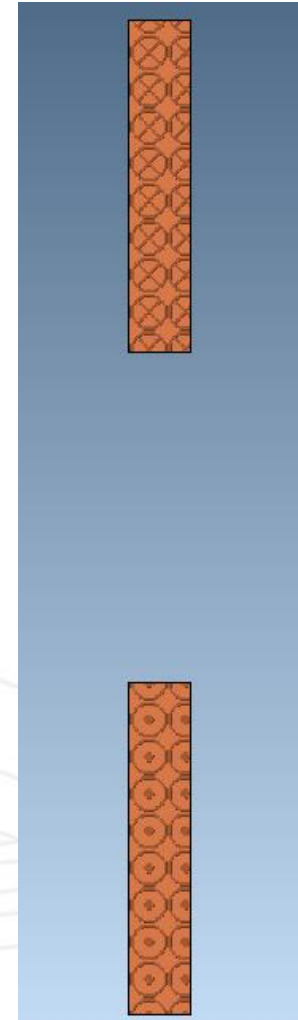
Présentation du modèle 2D axisymétrique - Géométrie

- ❑ Les volumes d'air ne sont pas visibles sur cette géométrie (vues 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). La culasse en bleu au stator a été ajoutée.



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

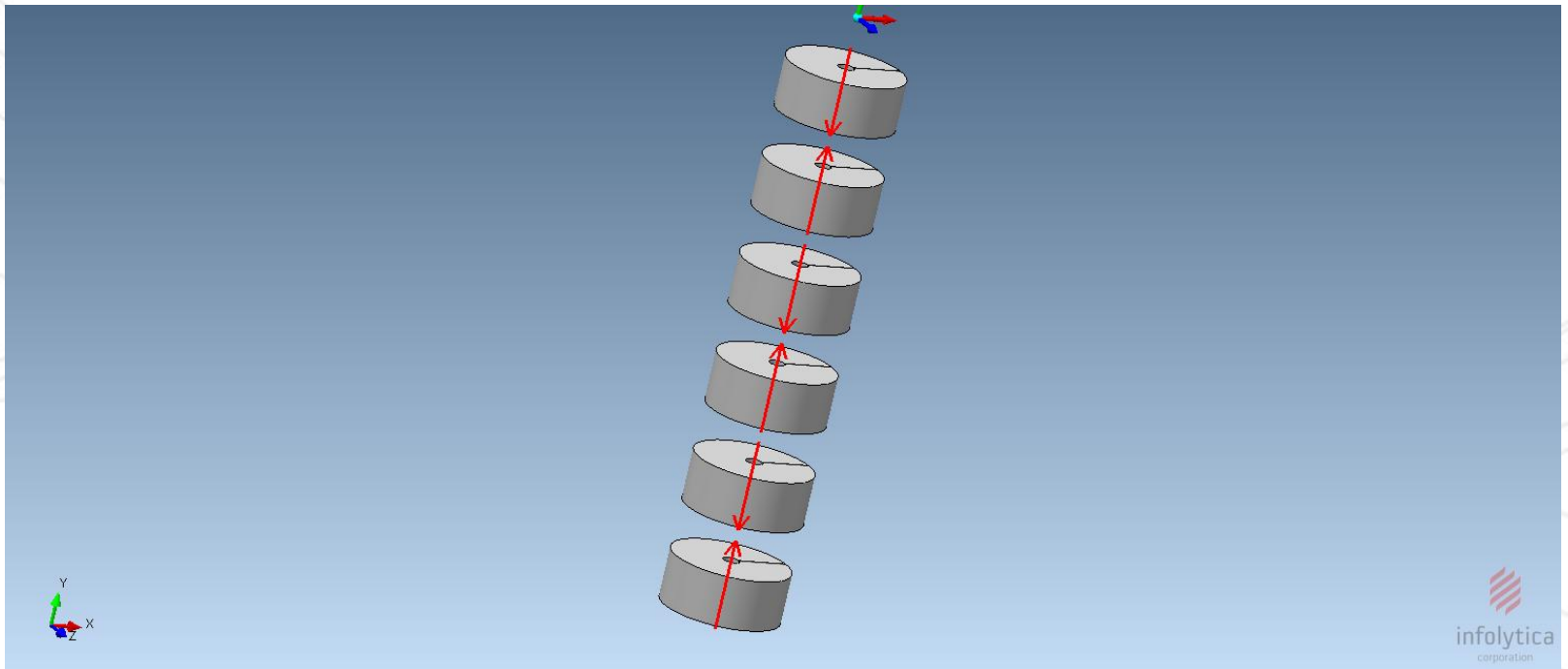
- Les aimants sont des aimants de type terres-rares NdFeB de grade N52. On utilise pour la modélisation les propriétés magnétiques de l'aimant VACODYM 722HR de chez Vacuumschmelze. Les aimants de ce grade ont **une température de fonctionnement max très basse, 50°C** et il est important de le souligner,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

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

				Energy density				Temperature coefficient				Density	Max. cont.-temperature	
								20-100 °C		20-150 °C				
H _{cb} min. kA/m	kOe	H _{ci} min. kA/m	kOe	(BH) _{max} typ. kJ/m ³	MG0e	(BH) _{max} min. kJ/m ³	MG0e	TC (B _r) typ. %/°C	TC (H _{ci}) typ. %/°C	TC (B _r) typ. %/°C	TC (H _{ci}) typ. %/°C	ρ typ. g/cm ³	T _{max} ²⁾ °C	°F
835	10.5	875	11	415	53	380	48	-0.115	-0.77			7.6	50	120

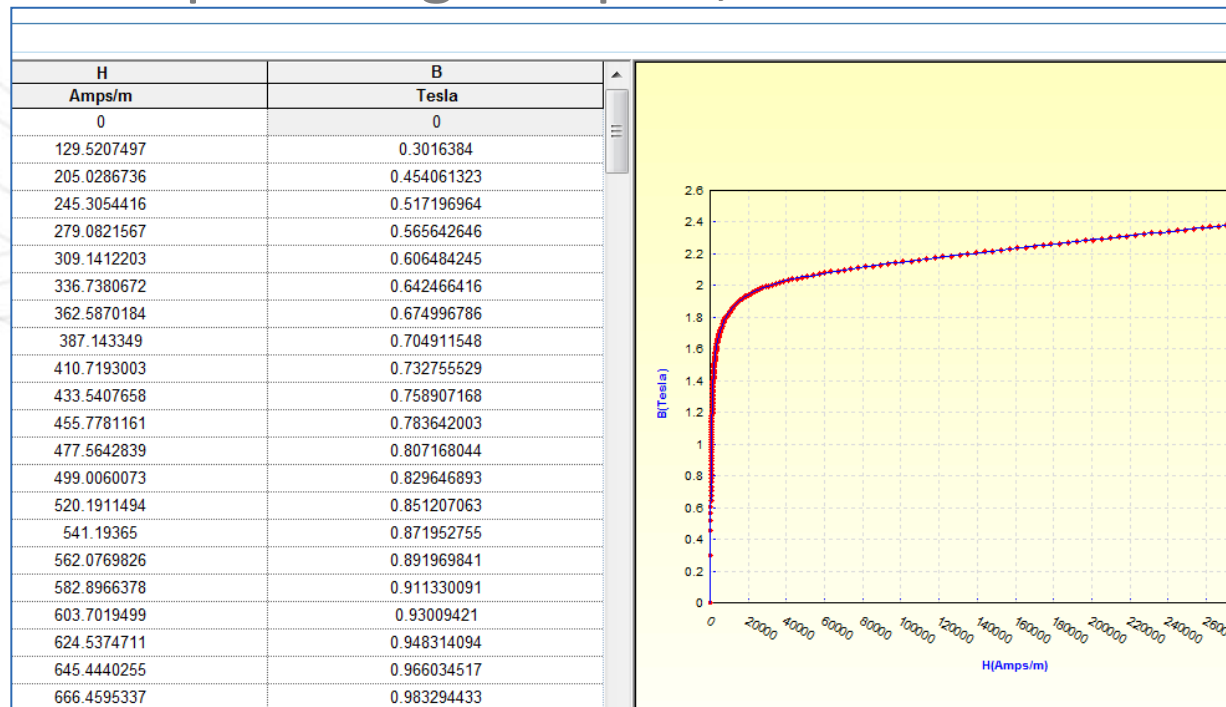
Aimants – Direction magnétisation

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



Circuit magnétique Stator

- Pour le circuit magnétique on considère un matériau de type Acier 1010 doux, présentant de bonnes caractéristiques magnétiques, usinable et soudable.



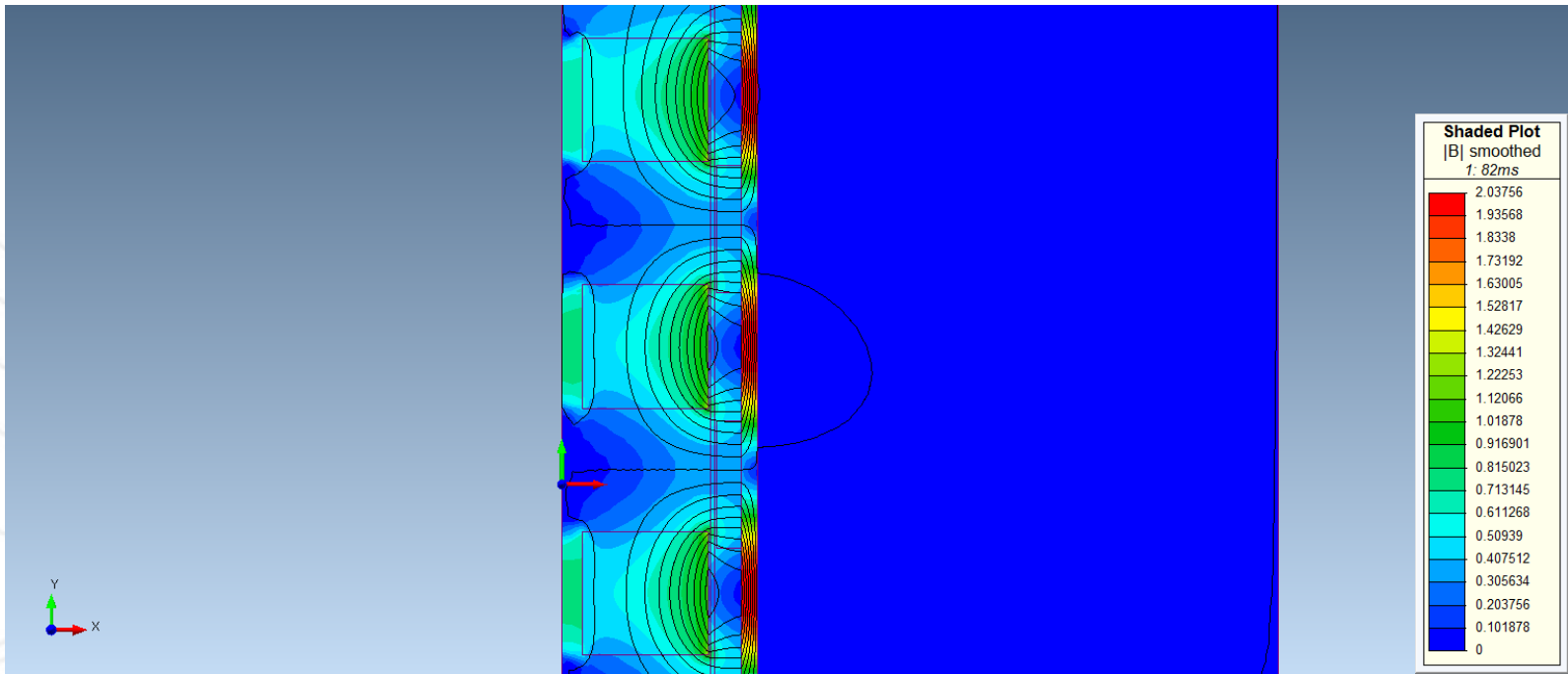
Simulations – Tensions Induites

- ❑ 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**.

Simulations – Tensions Induites

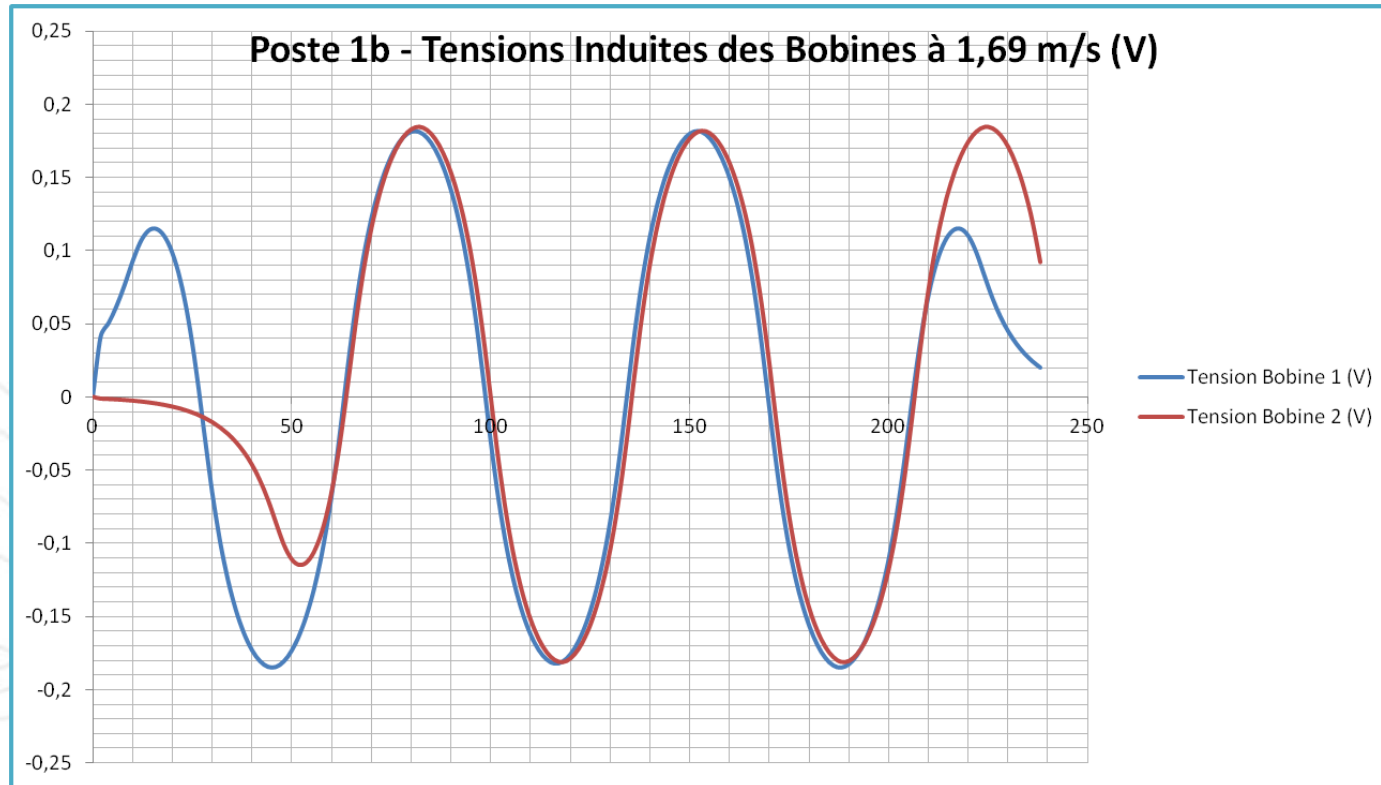
- ❑ A cette vitesse linéaire avec des longueurs d'aimants de 30 mm on considère une période électrique de 71 ms soit une fréquence électrique de 14Hz.
- ❑ On représente ci-après une distribution de densité de flux et les courbes tensions induites.
- ❑ Les calculs ont été réalisés pour une température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

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



- On observe des densités de flux proche de 2T en présence du circuit magnétique, en particulier dans la culasse statorique avec comme raison des perméabilités supérieurs, de l'ordre de 40 dans les zones saturées et proche de 1860 ailleurs dans la culasse.

Simulations – Tensions Induites

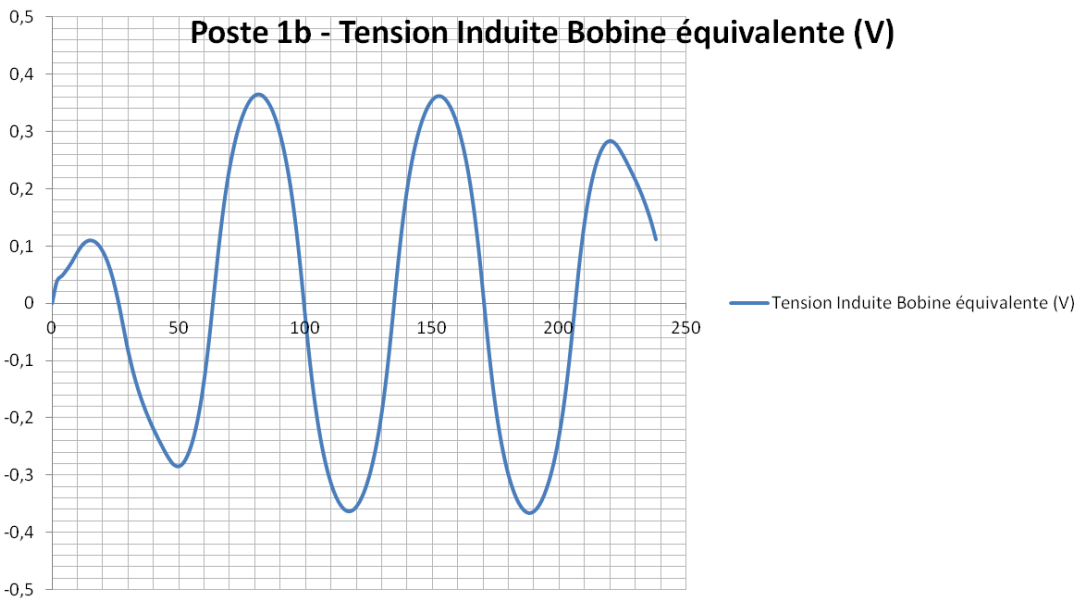


On observe un léger déphasage entre les bobines qui est du à la différence de longueurs entre les bobines (31.1 mm) et les aimants (30 mm). Chaque bobine a une tension induite équivalente de fréquence électrique 14hz.

Simulations – Tensions Induites

- On a une tension induite pour une vitesse de 1.69 m/s de **0.36V** peak par bobine pour une spire et un aimant de B_r égal à 1.44T. On observe un gain de 44% par rapport à la configuration air-cored. On peut donc considérer une constante de bmf ou de tension induite de l'ordre de **0.213 V.s/m**.

Poste 1b - Tension Induite Bobine équivalente (V)



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

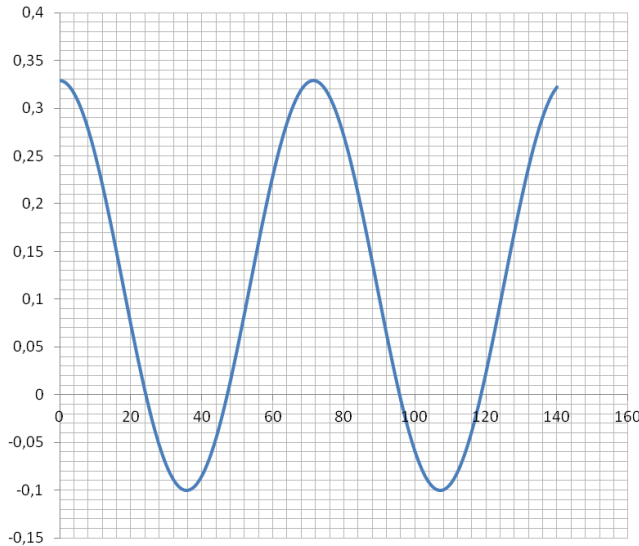
Simulations - Force

- ❑ 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

□ La force exercée sur la paire de bobines pour un courant de 1A et 1 spire est de **0.2147N**. On retrouve la constante de bémf ou de tension induite.

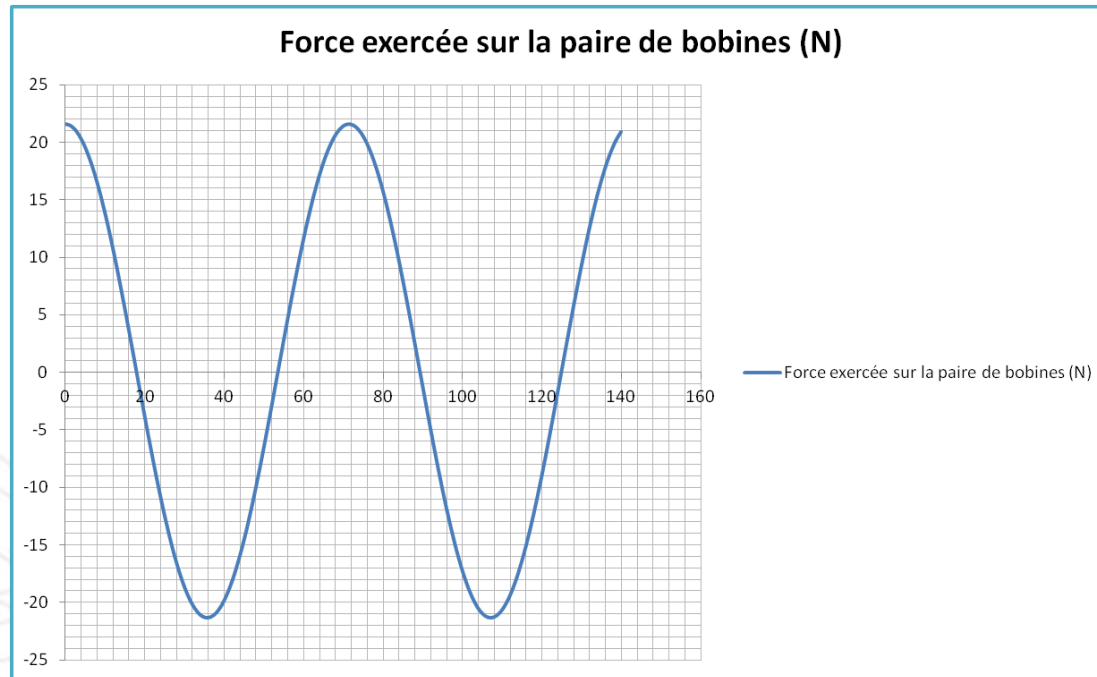
Force exercée sur la paire de bobines (N)



Simulations – Force 1 A 1 spire par bobine

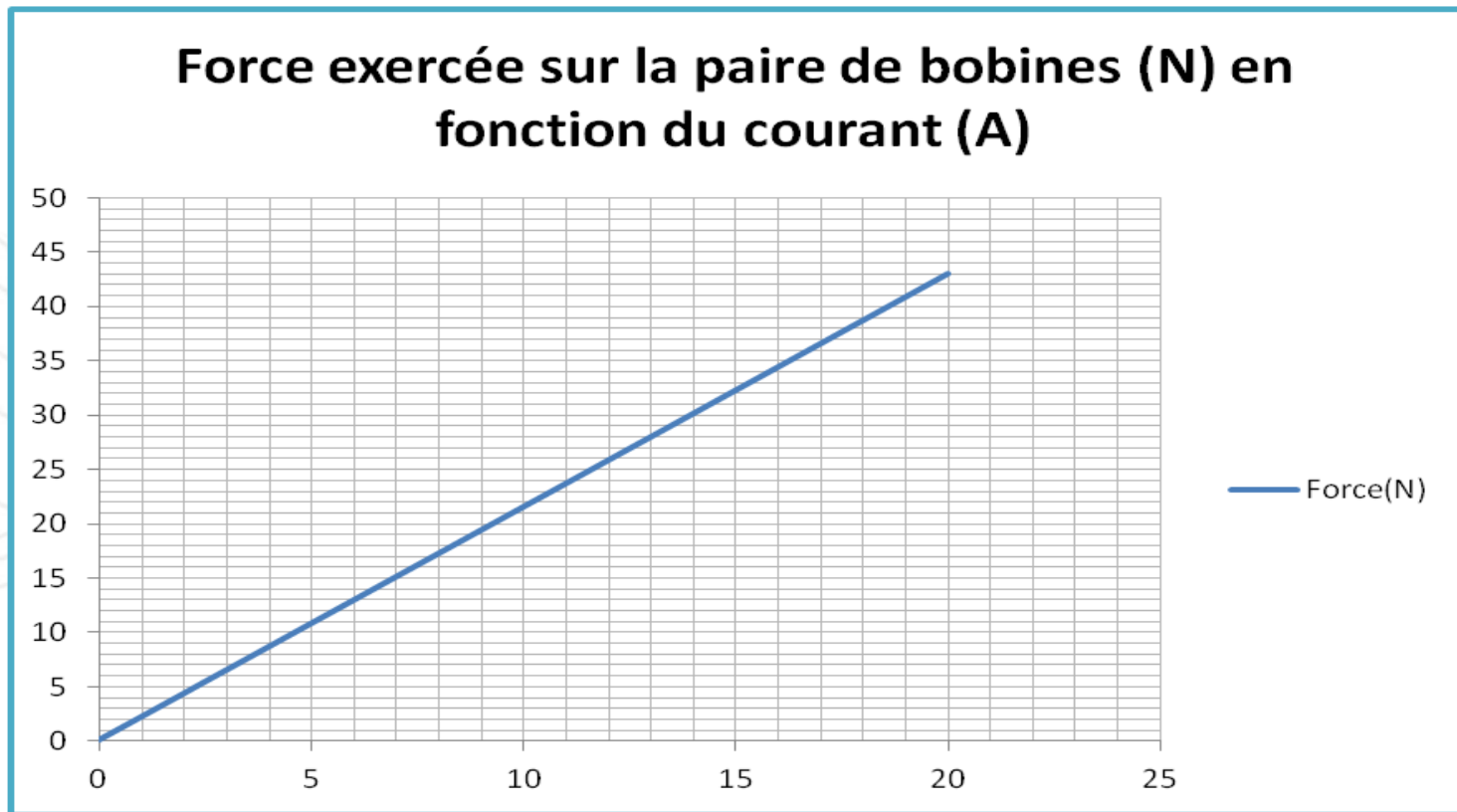
- On observe une valeur moyenne non nulle. Cette valeur moyenne correspond à la force exercée par les aimants seuls sans courant dans les bobines sur le stator. Ce qui est important est la valeur crête de la force ramenée à une valeur moyenne nulle ou la moitié de la valeur crête à crête de la force simulée. On obtient une force de **0.2147 N** soit une augmentation de **45% par rapport au dispositif air-cored (0.148N)**. On retrouve l'augmentation sur la tension induite. La tension induite et la force sont liées respectivement à la vitesse et le courant avec des coefficients ou constantes moteurs égales.

Simulations – Force 10 A 10 spires par bobine



- ❑ La force exercée sur la paire de bobines et la culasse est comme calculée comme précédemment et on obtient une force de **21.47N**.

Simulations - Force vs courant – Bobines à 10 spires



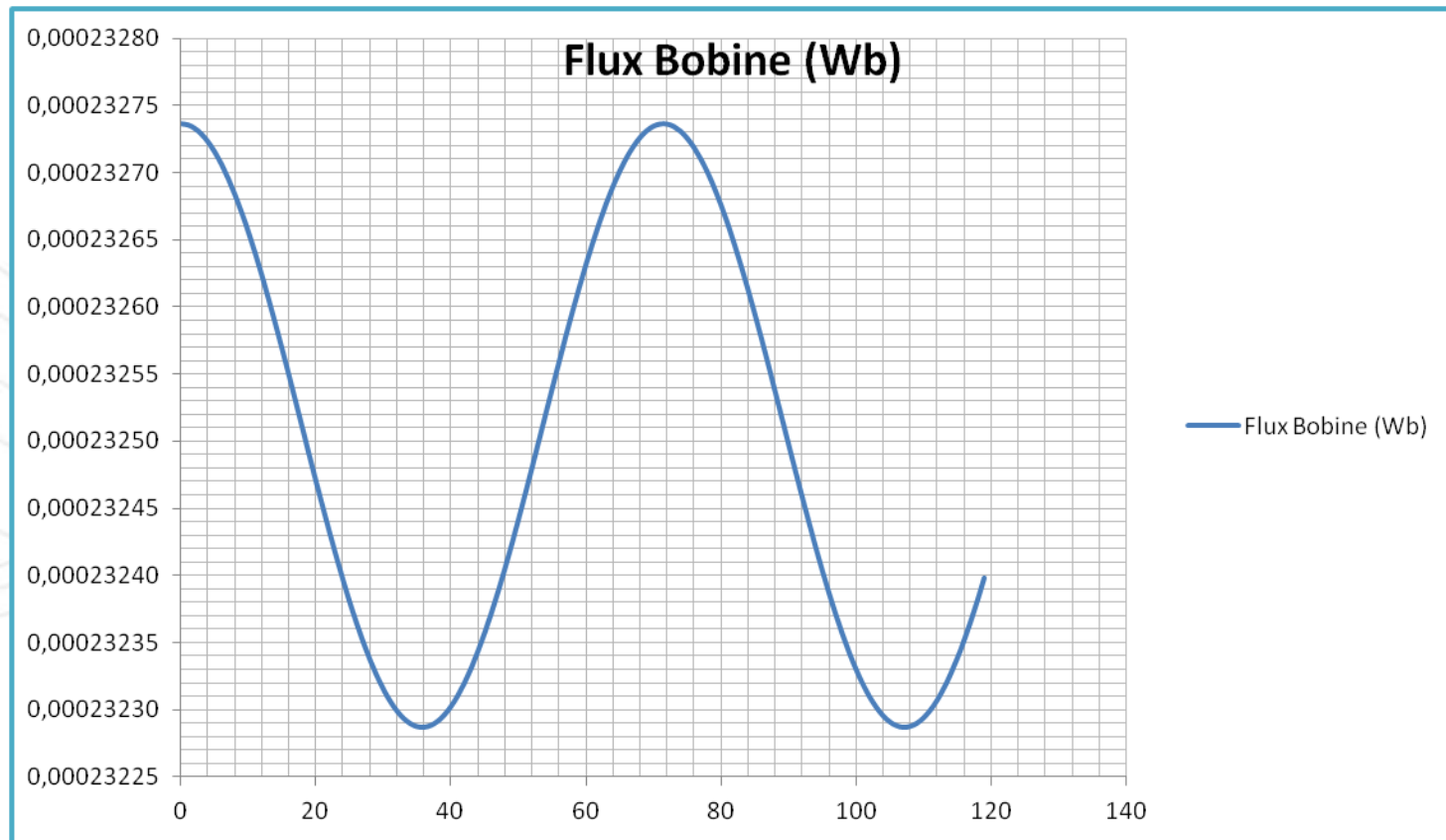
Simulations - Force

- La force est proportionnelle au courant et au nombre de spires dans un cas de circuit magnétique non saturée. Dans ce poste 1b on considère un circuit magnétique. On observe une linéarité de la force en fonction du courant pour 10 spires.

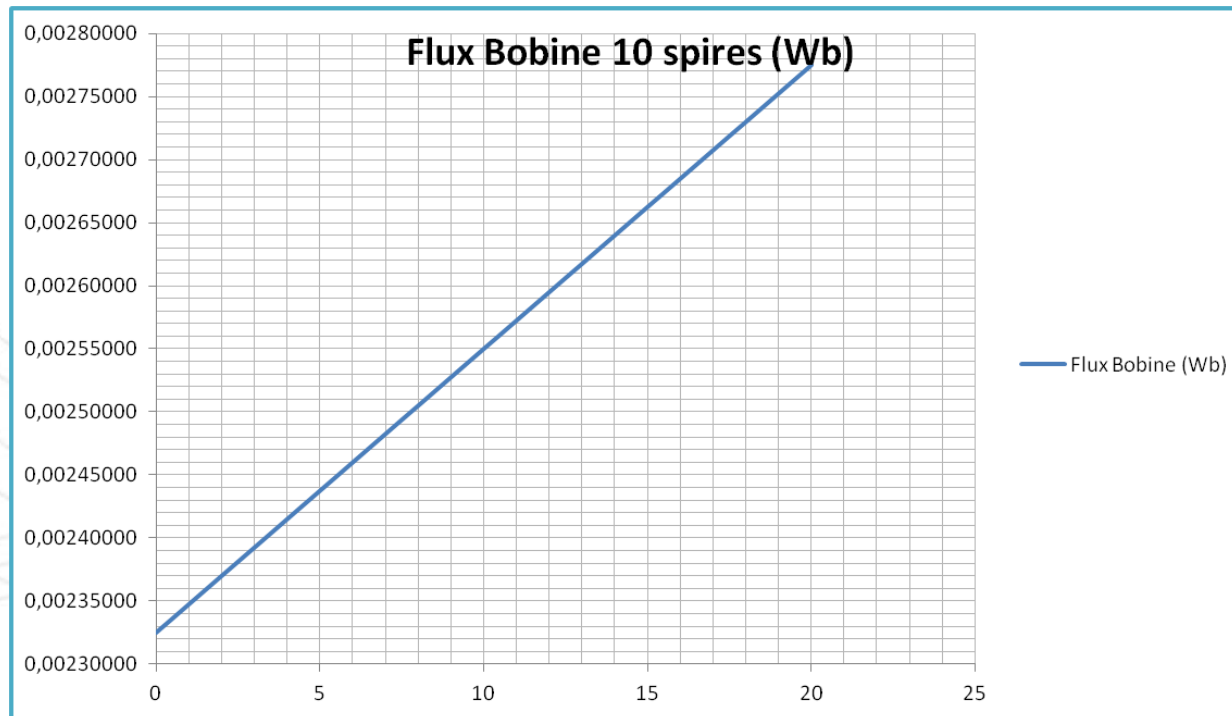
Simulations - Inductance

- ☐ 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.

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. On obtient alors une valeur constante de l'inductance de l'ordre de **$2.249 \times 10^{-7} \text{H}$** pour 1 spire et **$2.249 \times 10^{-5} \text{H}$** pour 10 spires (100 fois supérieure).
- *NB : On retrouve pour l'inductance une augmentation de +40% de sa valeur en ajoutant le circuit magnétique)*

Résistance des bobines

- ❑ Pour le calcul de la résistance on considère la section de bobine fournie de 186.6 mm^2 (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.

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 **130 spires par bobine** soit **260 spires pour la bobine équivalente** on a une tension aux bornes de la bobine de **58.4V**. 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	$R_{20} = 0,00682 \text{ ohm}$
Nombre de spires bobine	$N = 10$
Inductance de l'actionneur	$L_{\text{bob}} = (0,00002249) \text{ H}$
Constante de back-emf	$K_v = 2,13 \frac{\text{V}}{\text{m s}^{-1}}$
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	
$x = 13$	
$U_1(x) = \sqrt{\left(x^2 \cdot R_{\text{bob}} \cdot I + 1 \cdot x \cdot K_v \cdot v_0 \right)^2 + 1 \cdot \left(\left(L_{\text{bob}} \cdot x^2 \right) \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot I \right)^2} \quad U_1(x) = 58,4177 \text{ V}$	

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 **279N** avec **130 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 **10A/mm²**.