



convertisseur
d'énergie

Intégré
Intelligent

Gestion Thermique des convertisseurs intégrés

S. Harmand, S. Ounezerfi, R. Boubaker

Contact : souad.harmand@univ-valenciennes.fr

Les rencontres
de la Recherche
& de l'Innovation



Événement animé par



Initié et
financé par



Cofinancé par



Ce projet est cofinancé par l'Union européenne
avec le Fonds européen de développement régional



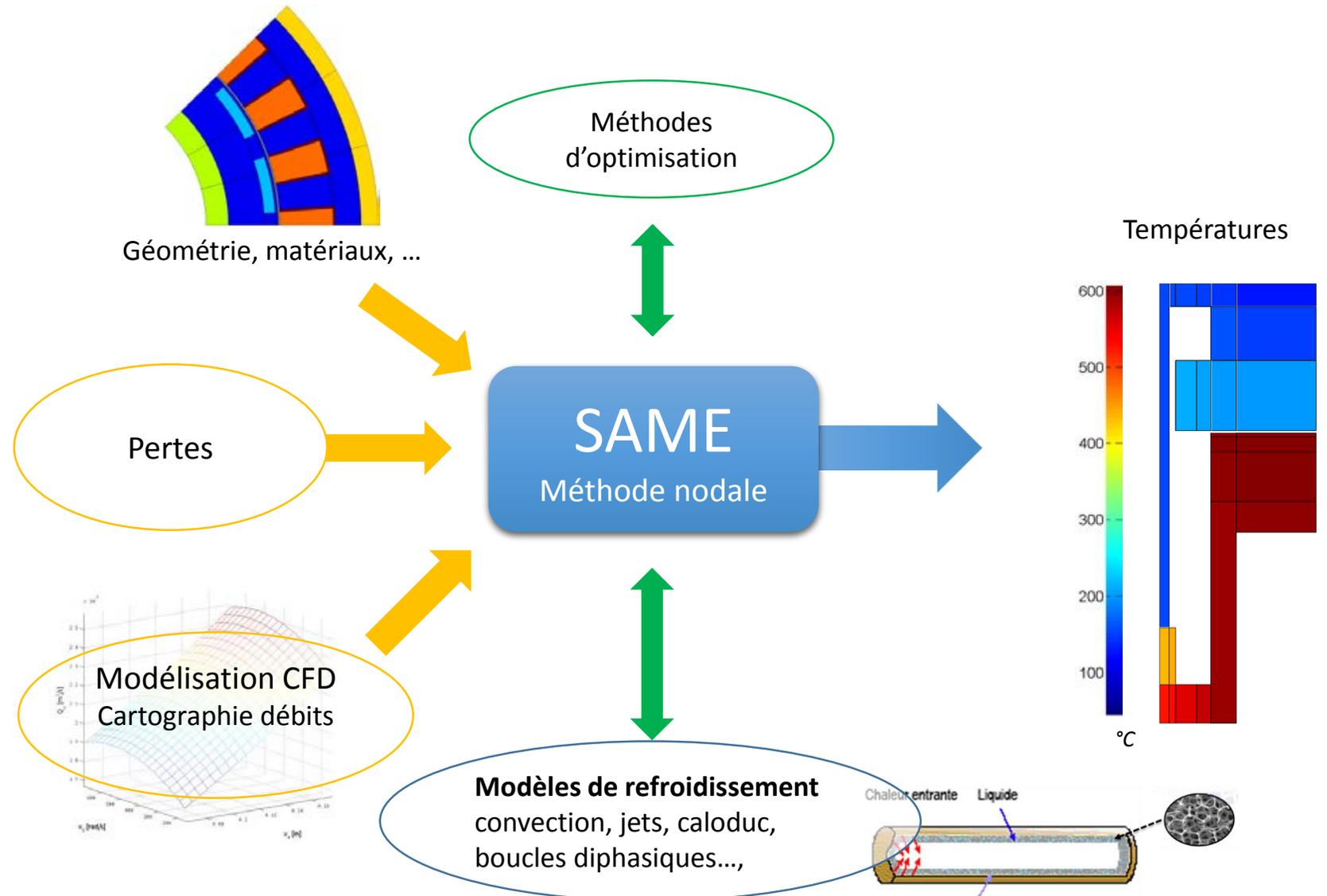
Les objectifs de la programmation

Modélisation aéroulque et thermique

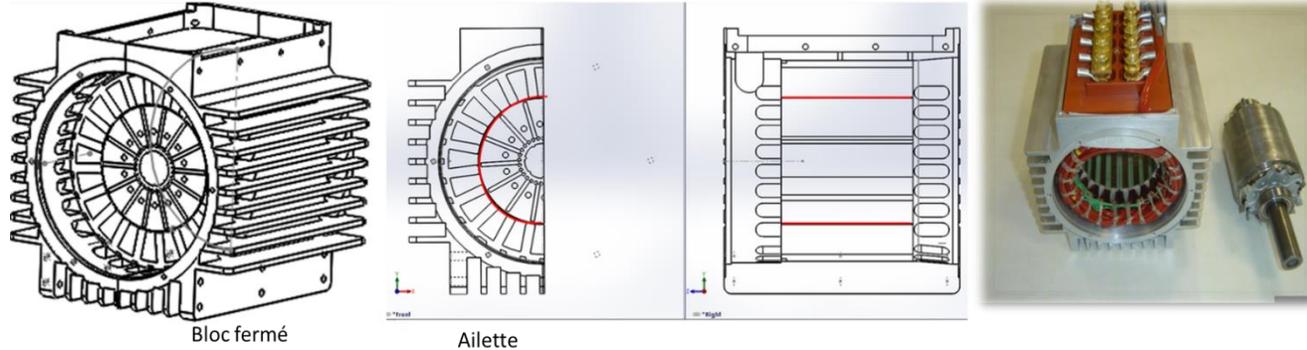
Identification des échauffements en régime permanent, stationnaire et dégradé

Proposition de nouvelles solutions de gestion thermique

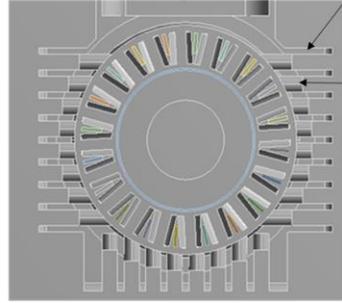
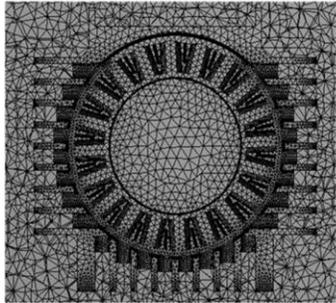
Simulation
Aérothermique
des
Machines
Electriques



Machine ouverte
Brasseurs sur l'arbre de rotation

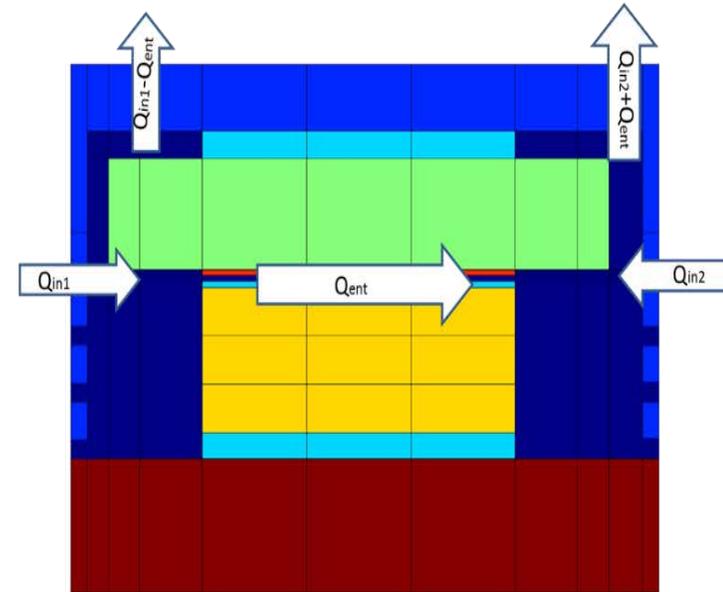


Maillage
CFD : 4 millions de mailles

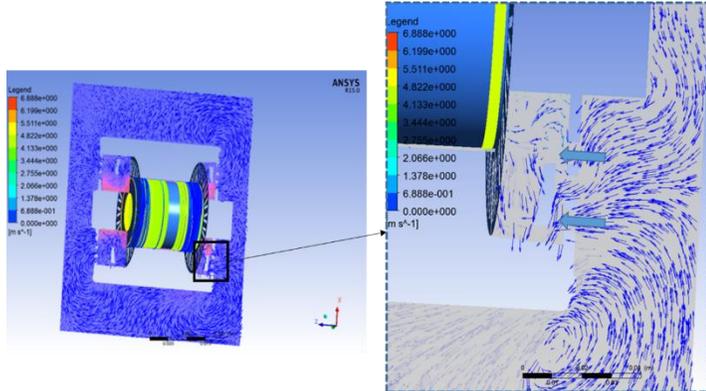


Cartographie des fluids : 20N,m ; 750 tr/min

	Debit (L/S)
Q_{in1}	10.22
Q_{in2}	-7.75
Q_{ent}	0.745



Structure
De
l'écoulement

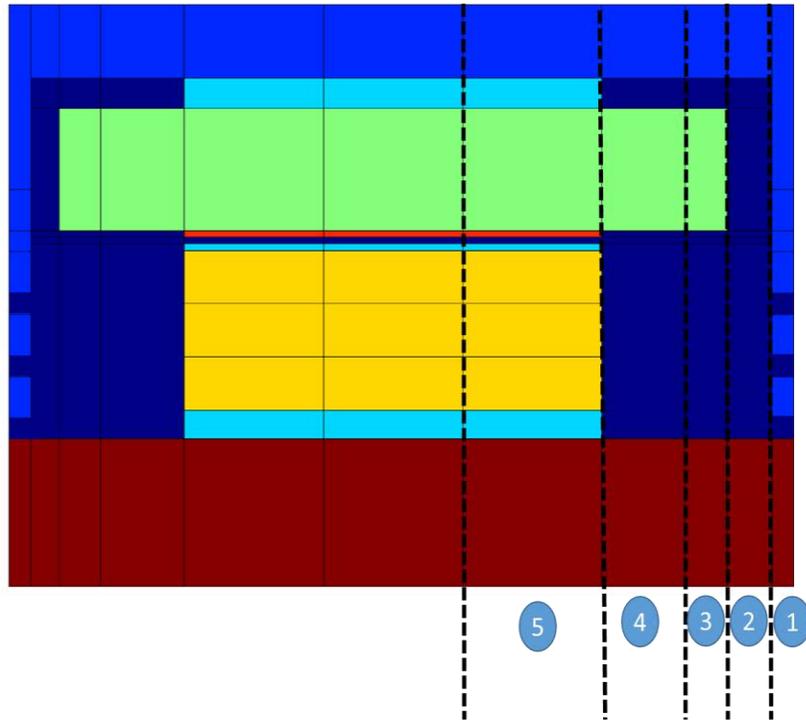


Nombre de noeuds : 3076

;

Temps de calcul : 3 minutes

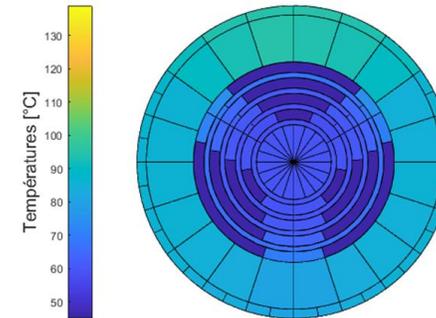
Décomposition axiale de la machine



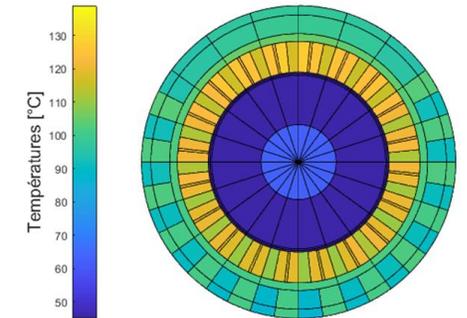
- 1 Section grille/carter
- 2 Section entrée air
- 3 Section têtes des bobines (1)
- 4 Section têtes des bobines (2)
- 5 Section rotor/stator

Arbre
Isolant
Aimant
Cuivre
Tôle
Carter
Air

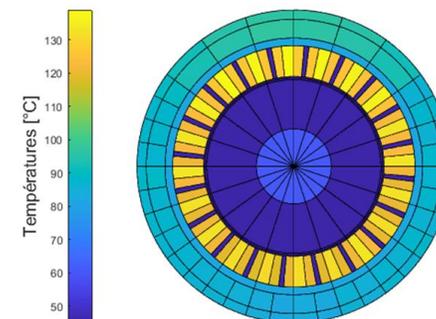
Cartographie des températures



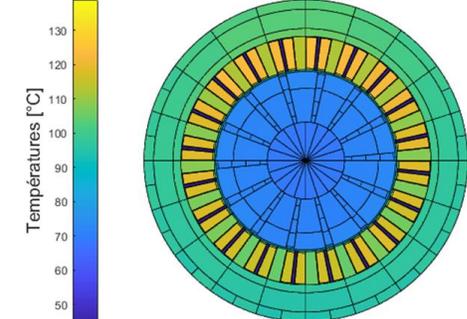
Coupe grille/carter



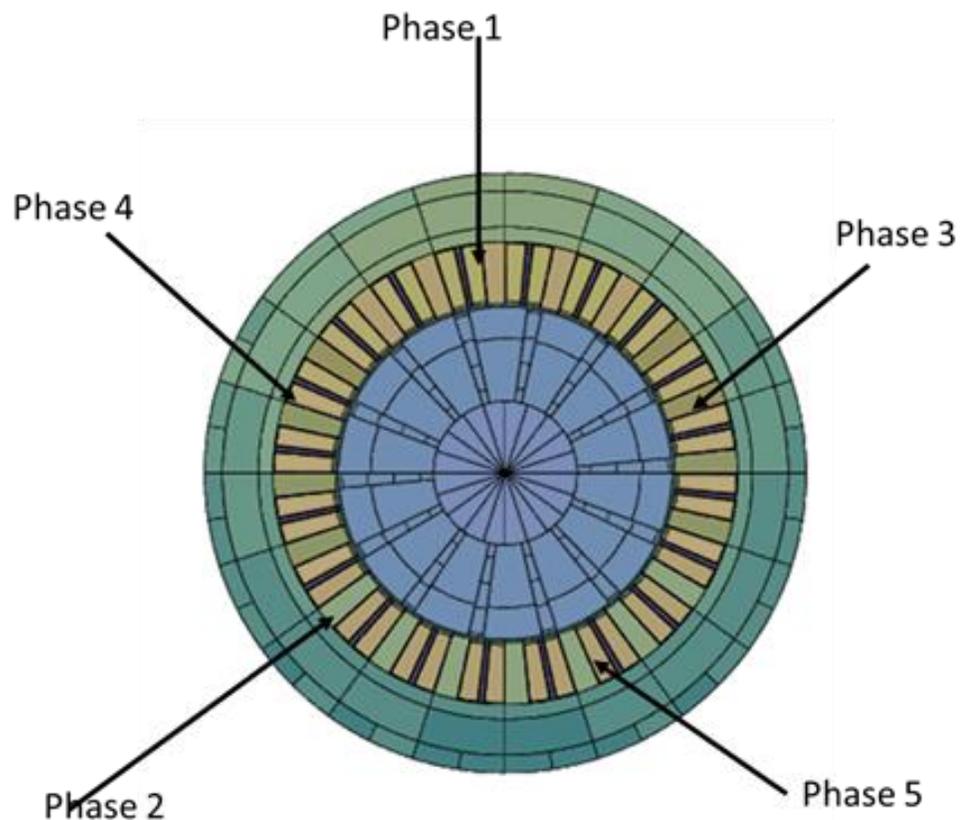
Coupe têtes des bobines1



Coupe têtes des bobines2

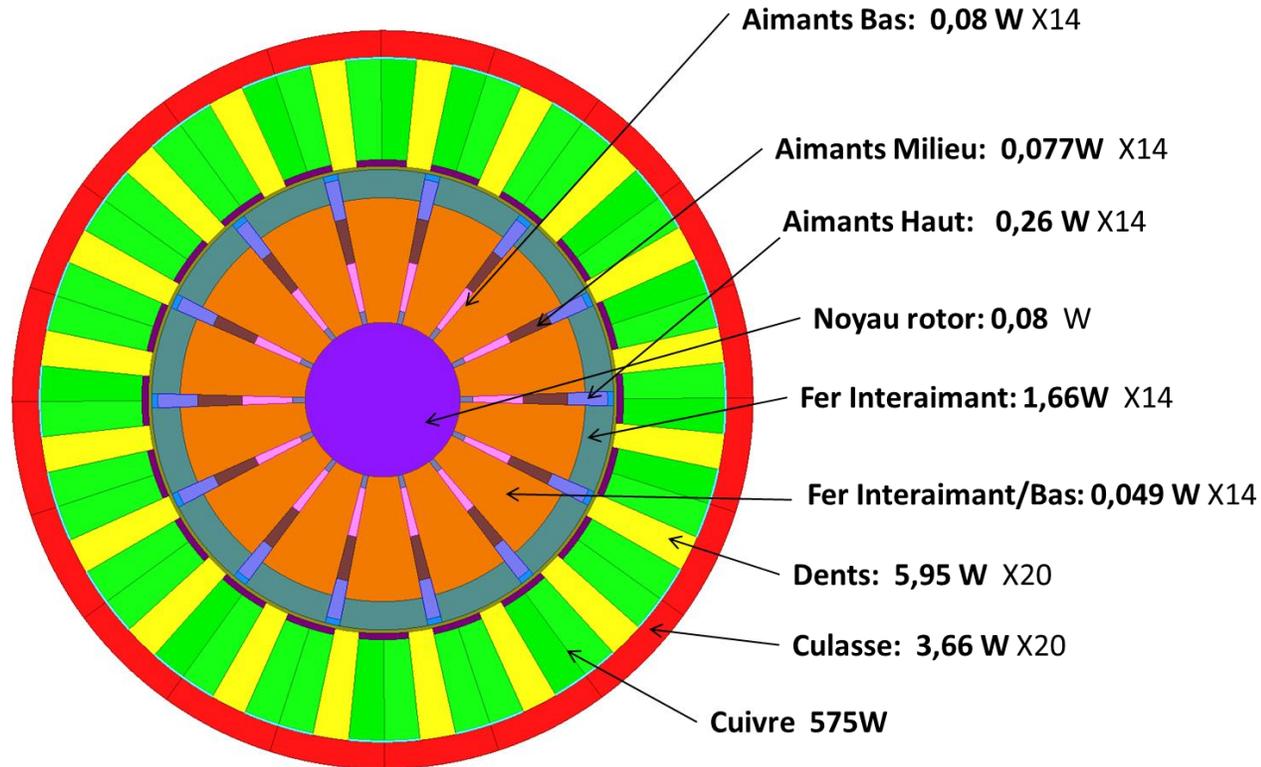


Coupe rotor/stator



Phase	T (°C) Essais	T (°C) Simulations	ΔT (°C)
1	131	125,2	6,2
2	99	116,7	16,3
3	110,2	116,8	6,2
4	102	113,5	11,5
5	114	114,8	0,8

Couple : 36 N,m ; Vitesse de rotation 3200 tr/mn



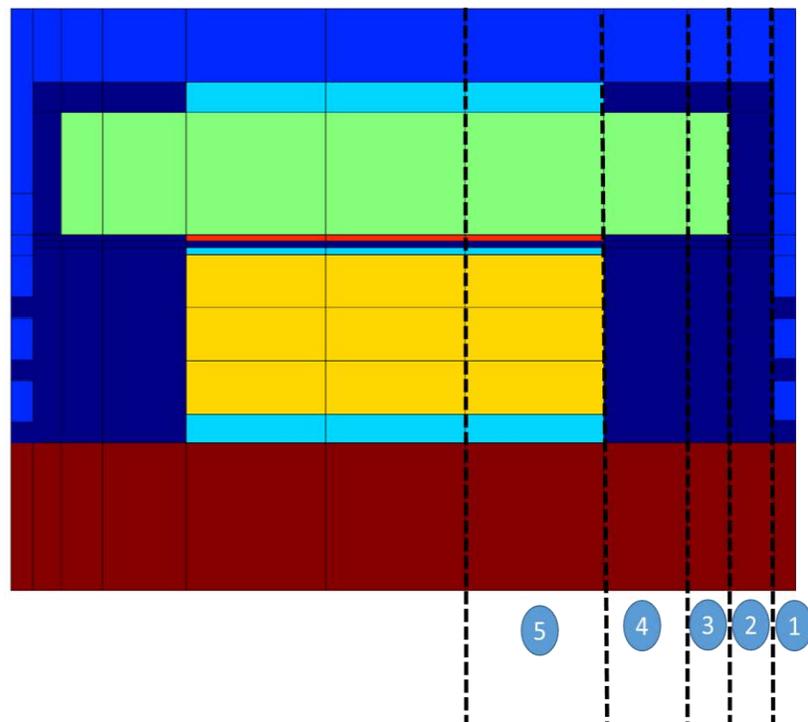
Pertes totales au rotor = 26,7 W
Pertes totales au stator = 110 W
Pertes totales Cuivres = 575 W

Nombre de noeux : 3076

;

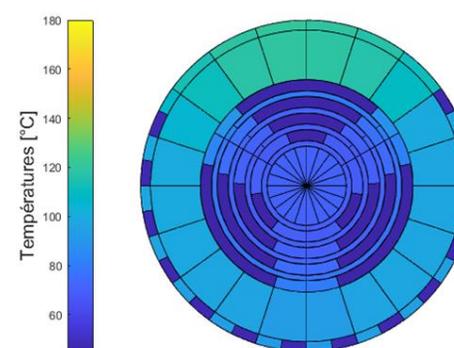
Temps de calcul : 3 minutes

Décomposition axiale de la machine

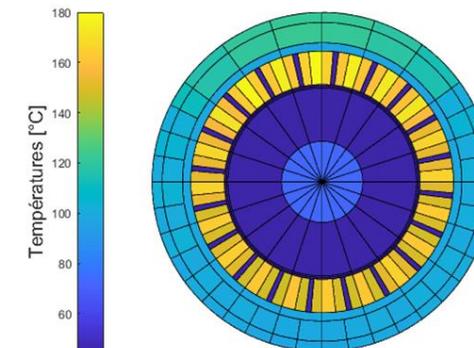


Cartographie des températures

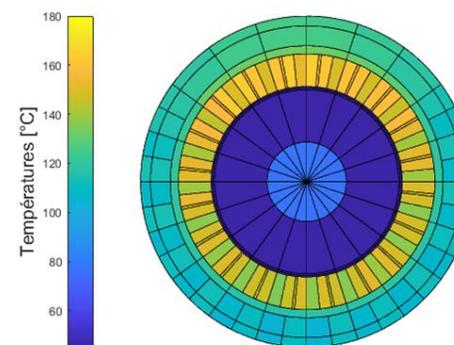
$T_{max} = 176,3^{\circ}C$



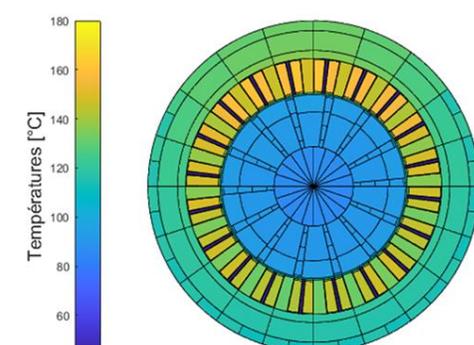
Coupe grille/carter



Coupe tetes des bobines1



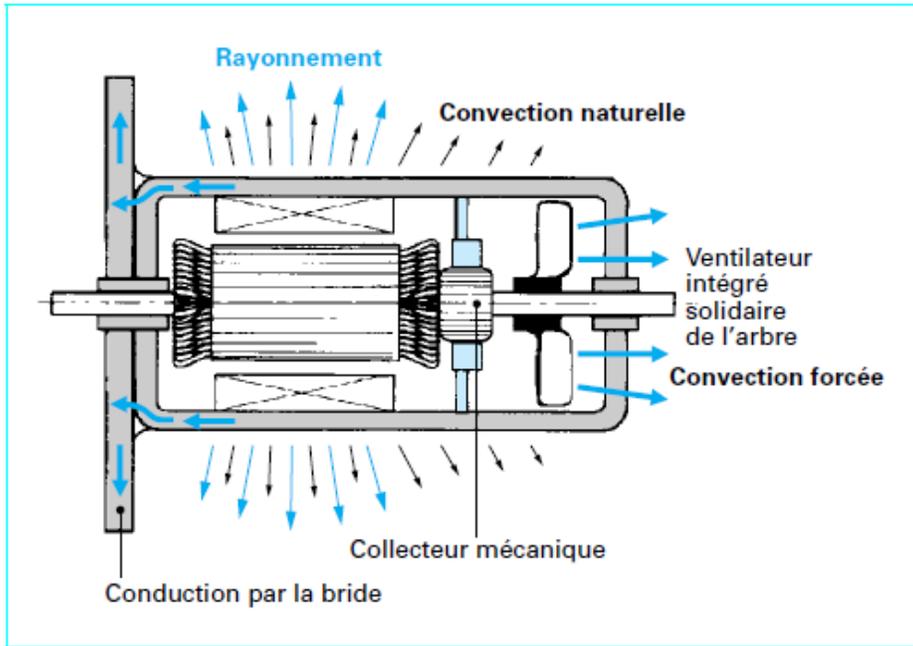
Coupe tetes des bobines2



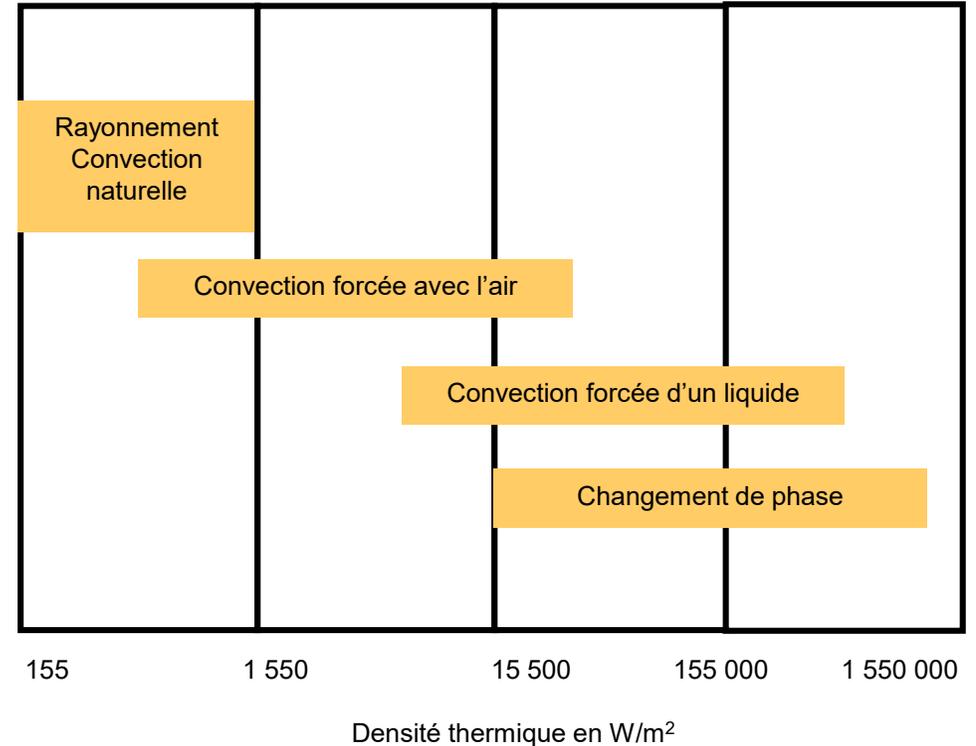
Coupe rotor/stator

Exemples d'échanges thermique dans une machines

Les 3 modes de transferts thermiques classiques
Conduction, Convection, Rayonnement

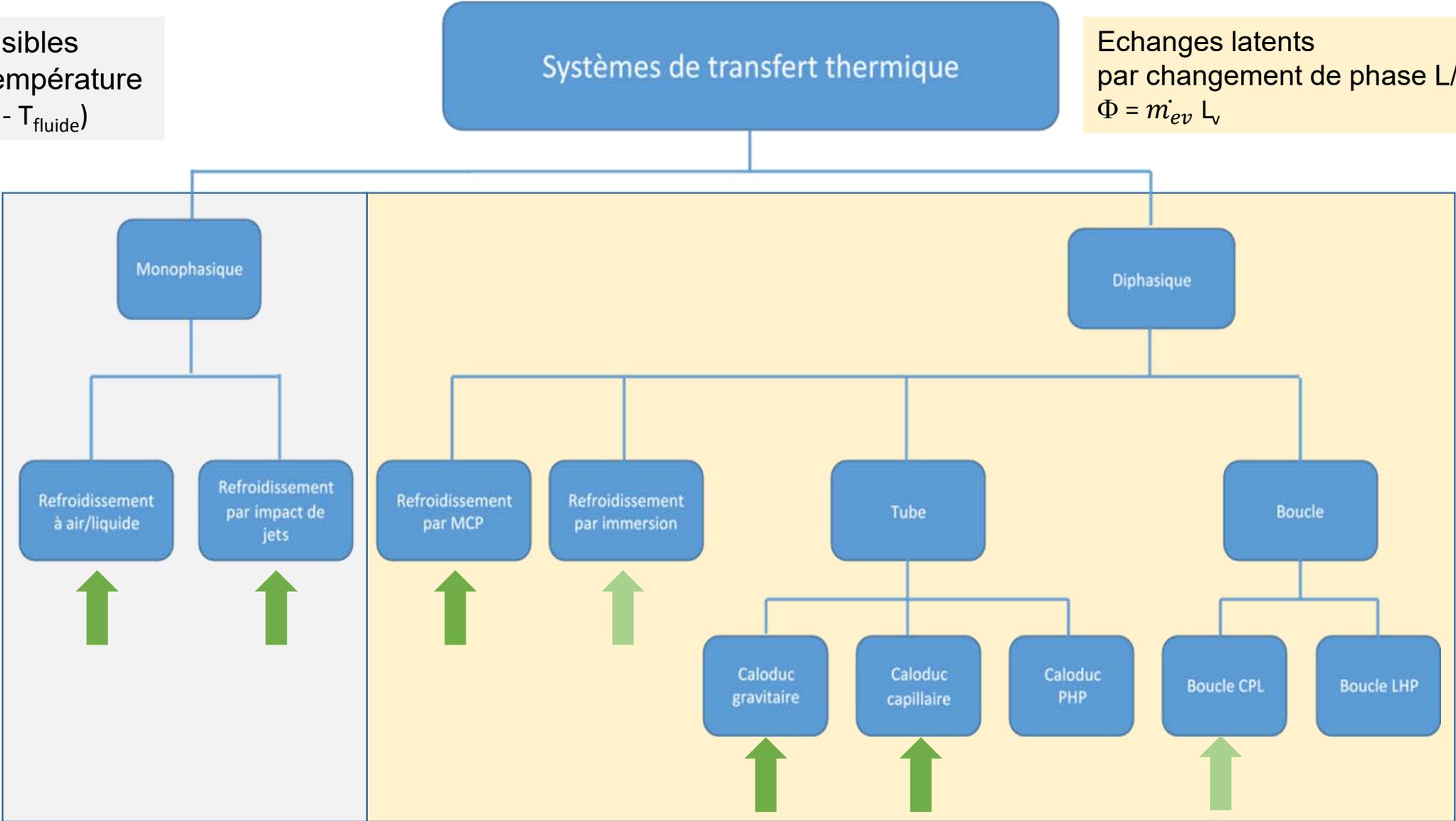


Performances des modes de transferts thermiques

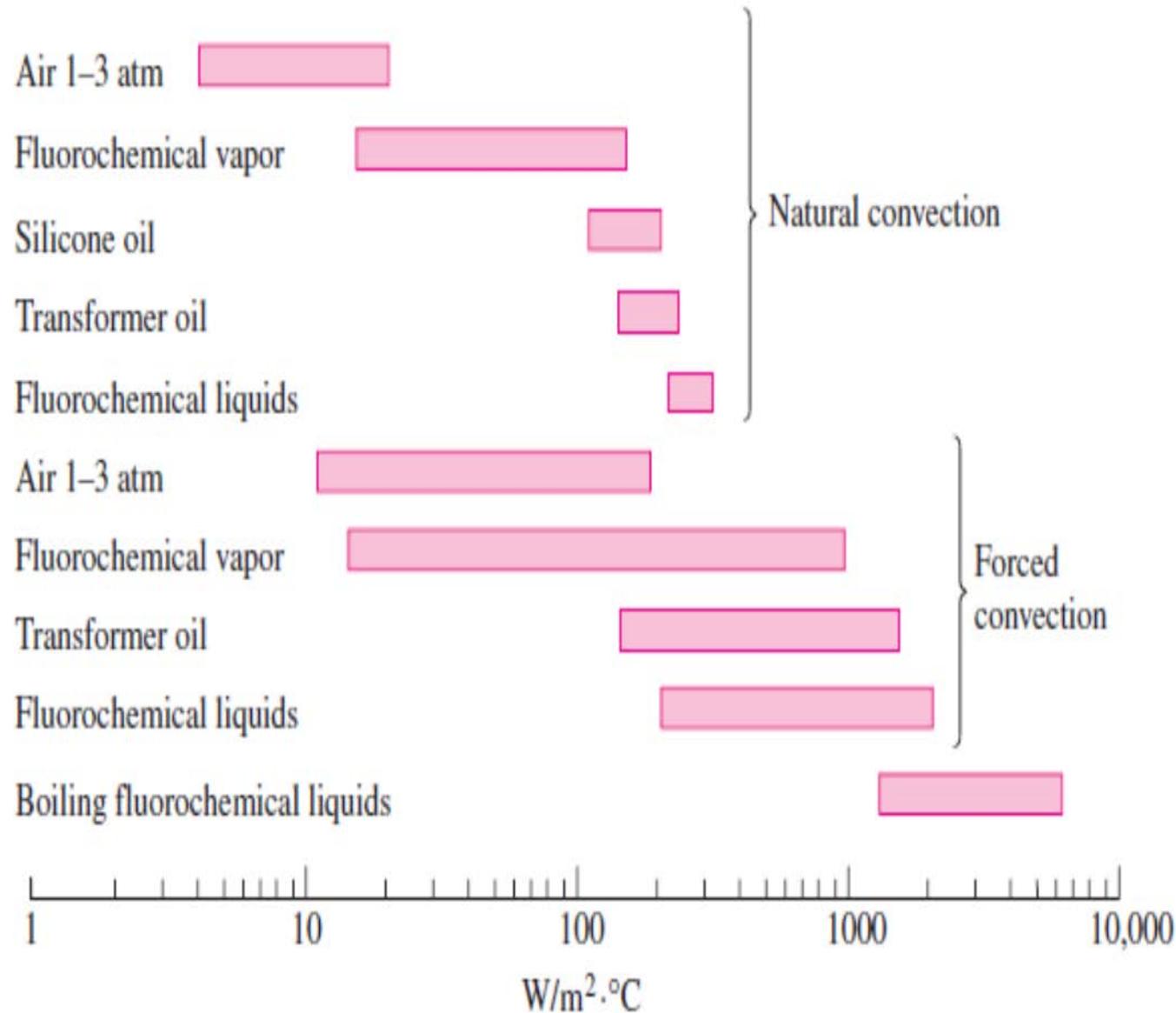


Echanges sensibles
par écart de température
 $\Phi = h S (T_{machine} - T_{fluide})$

Echanges latents
par changement de phase L/V ou S/L
 $\Phi = \dot{m}_{ev} L_v$

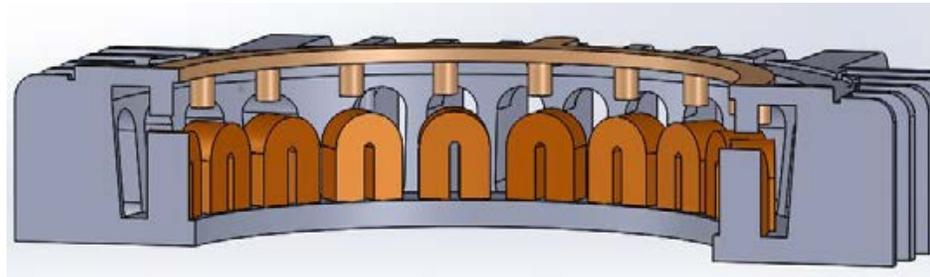
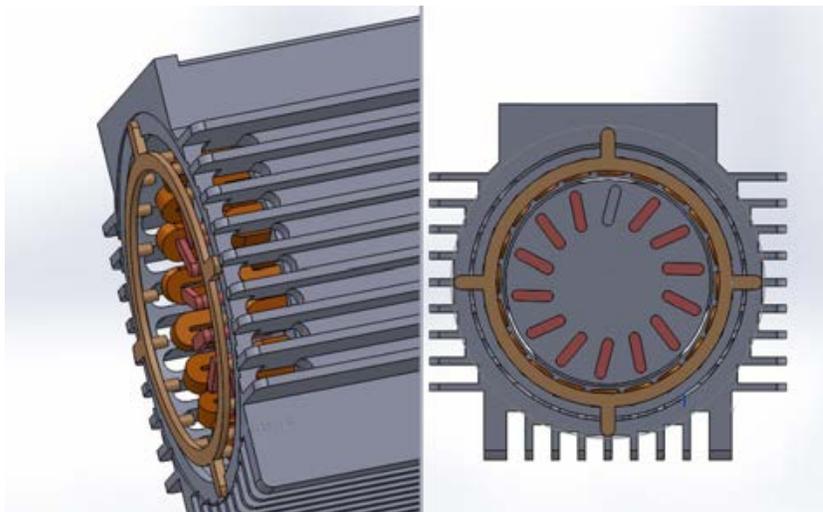


Performances

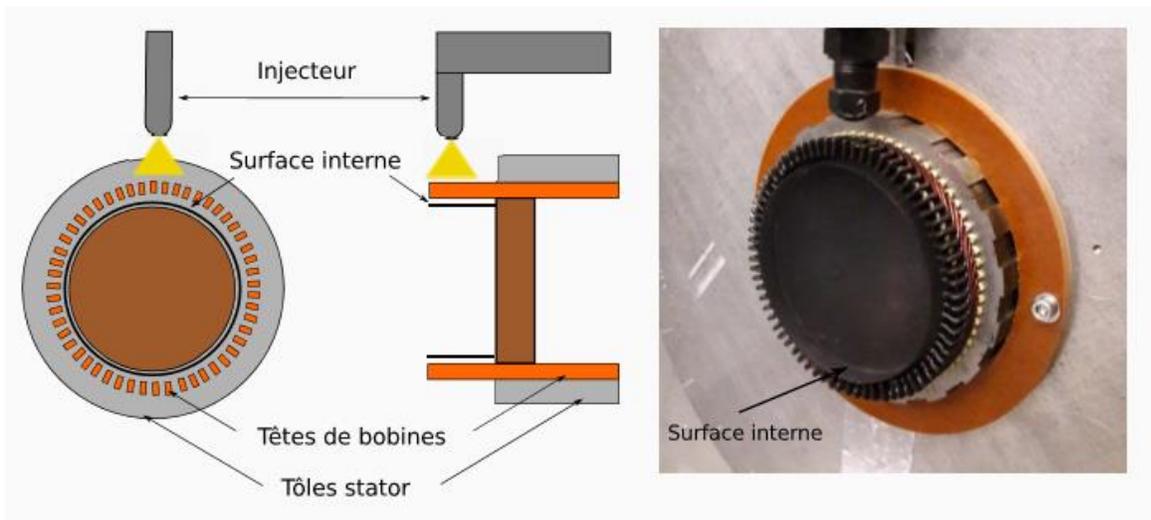
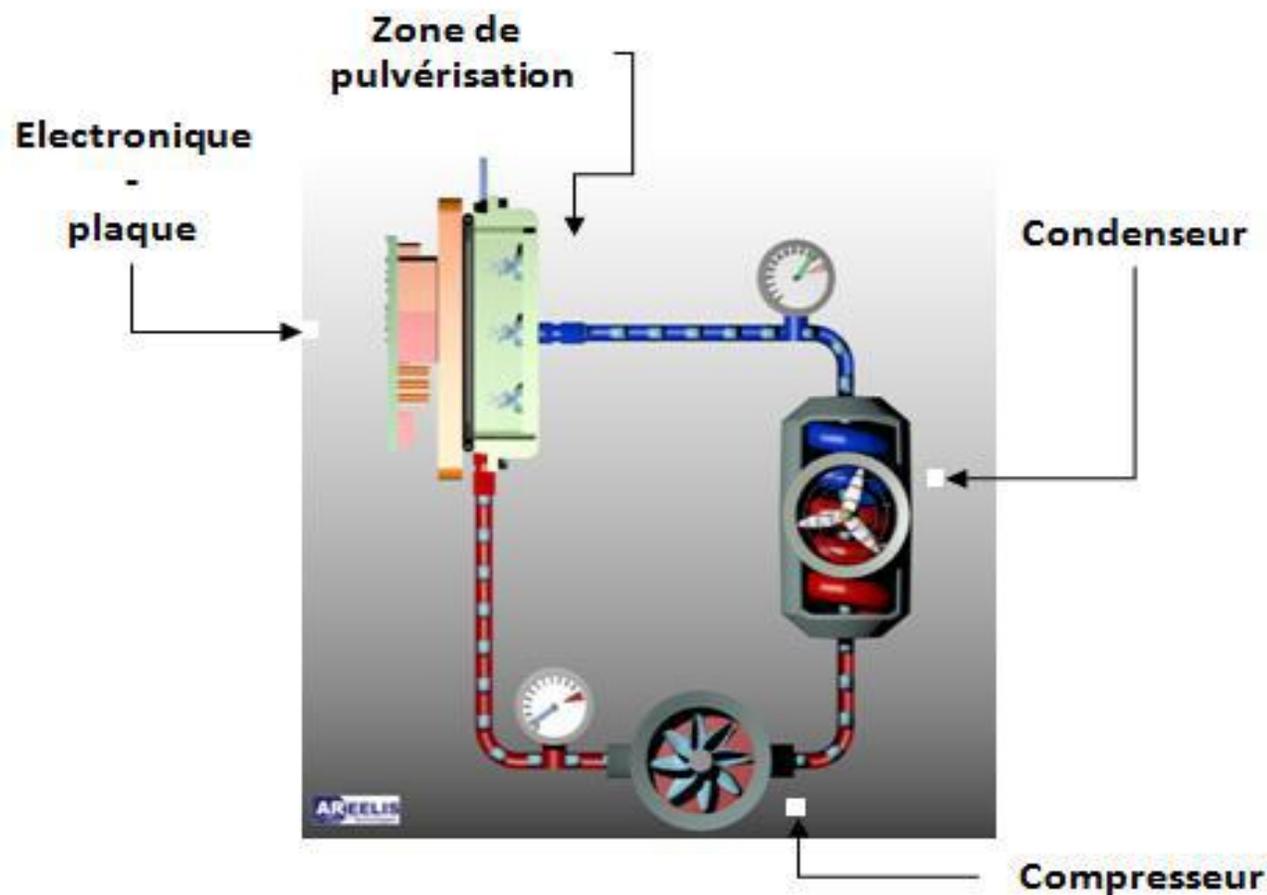


Caractéristiques

	Air	Huile	Liquide 3M Novec
Formulation			C ₄ F ₉ OC ₂ H ₅
Conductivité thermique (W/m·K)	0,0234	0,136	0,075
Masse volumique (Kg/m ³)	1,21	884	1400
Viscosité cinématique (m ² /s)	1,57×10 ⁻⁵	5,5×10 ⁻⁴	3,2 ×10 ⁻⁷
Capacité thermique (J/Kg,K)	1006	2000	1300
Chaleur latente (KJ/Kg)		1,97	142
Température d'ébullition (°C)	-194,3	300	34
Température de solidification(°C)			-122,5
Tension de surface (dynes/cm)			12,4
Pression de vapeur saturante (KPa)			64,6

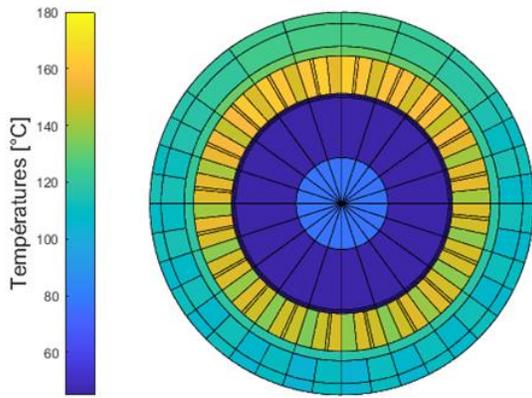


Exemple d'installation



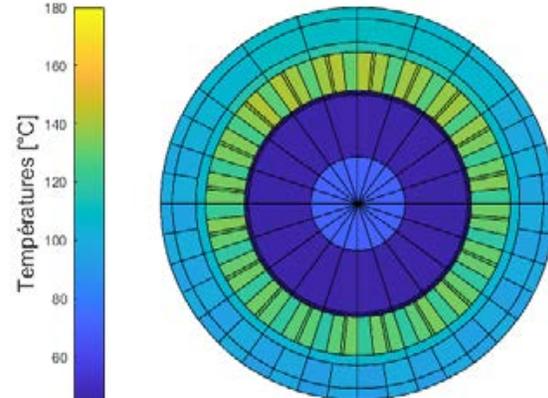
Têtes de bobines coupe 2

Cas de dimensionnement



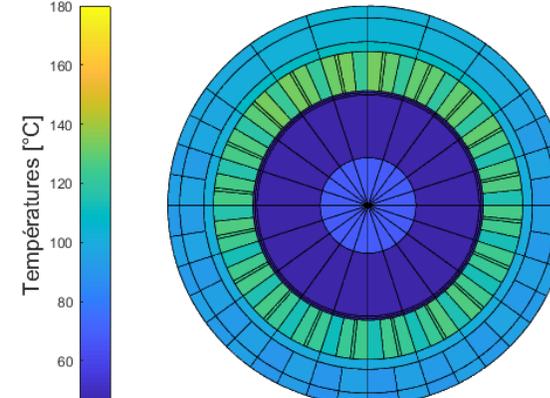
$T_{\max} = 176,3^{\circ}\text{C}$

Jet d'air



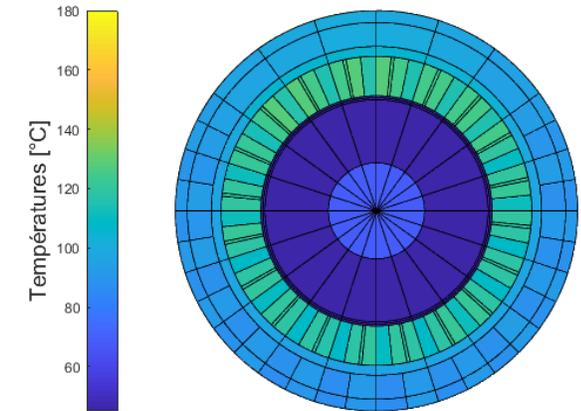
$T_{\max} = 142,2^{\circ}\text{C}$

Jet liquide dielectrique



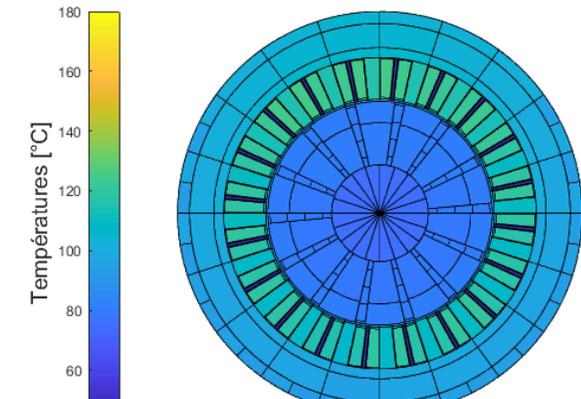
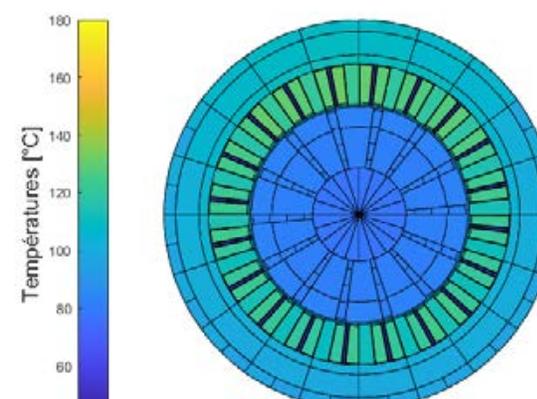
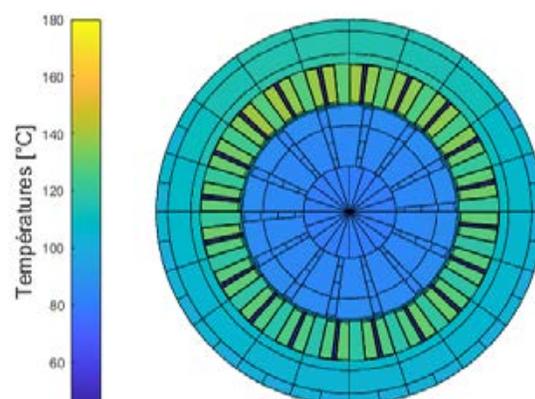
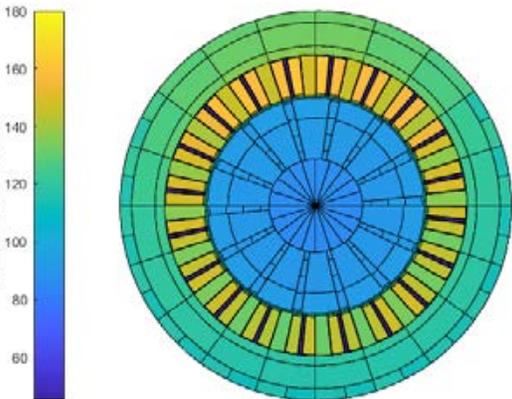
$T_{\max} = 133,4^{\circ}\text{C}$

Jet d'huile

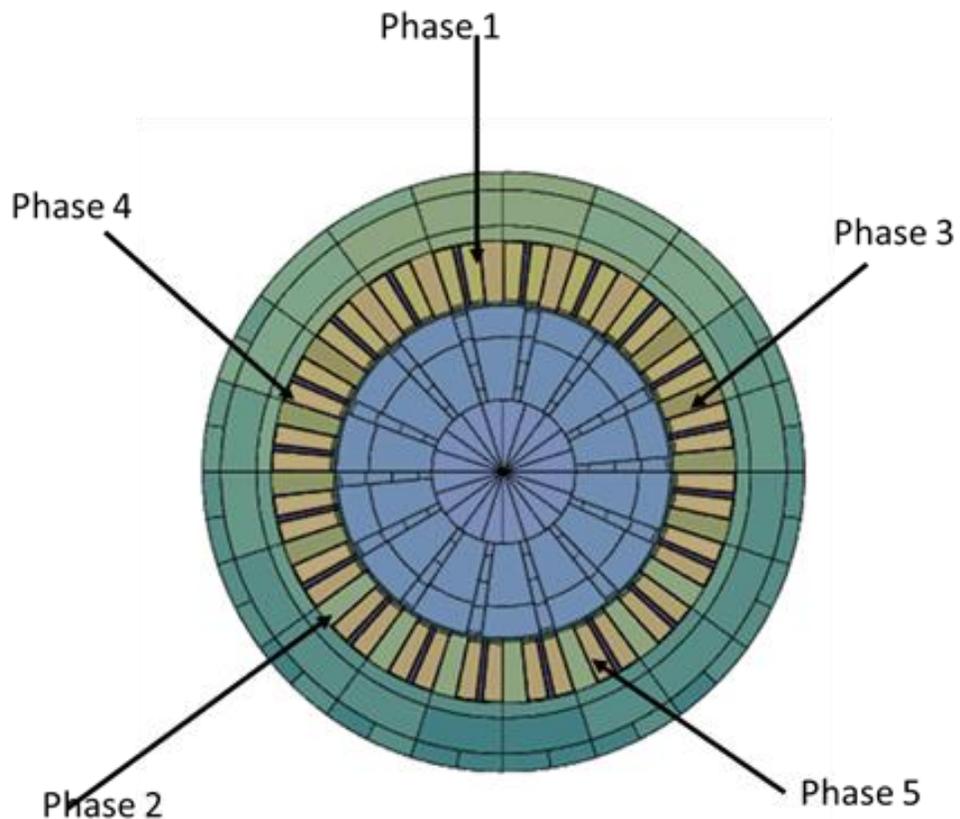


$T_{\max} = 127,6^{\circ}\text{C}$

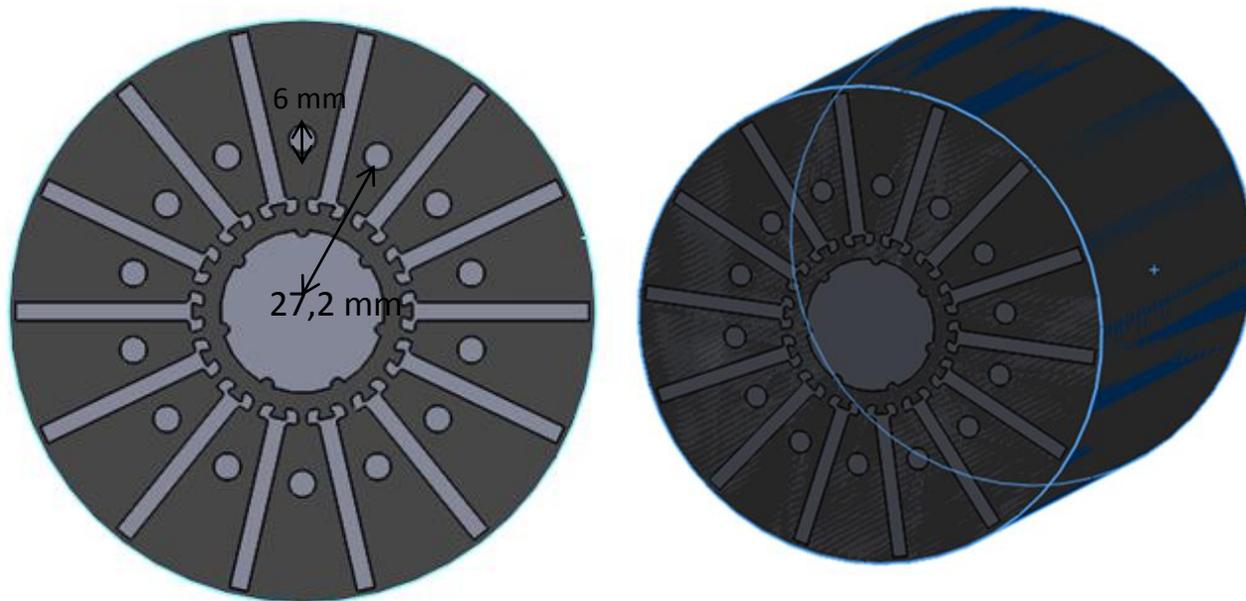
Coupe milieu rotor/stator



Comparaison des températures

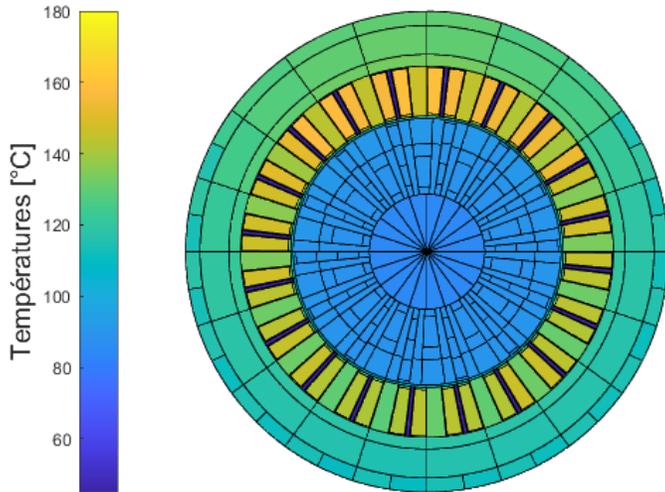


Phase	Cas de dimensionnement (T en °C)	ΔT Jet d'air	ΔT Jet 3M Novec 7200	ΔT Jet d'huile
1	158,2	14,1	28,1	35,7
2	149,2	14,5	28,65	37,75
3	152,01	13,41	26,21	33,71
4	151,8	13,6	26,7	33,7
5	148,5	14,3	28,4	37,6

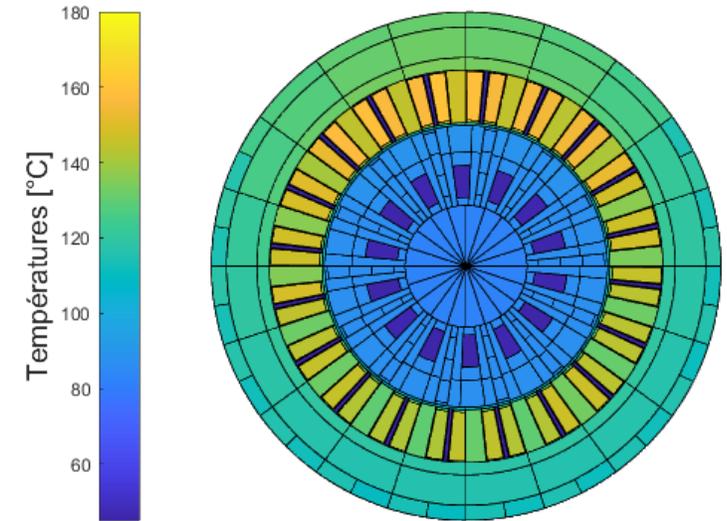


Résultats des simulations SAME

Cas de dimensionnement



Avec convection forcée dans les canaux du rotor

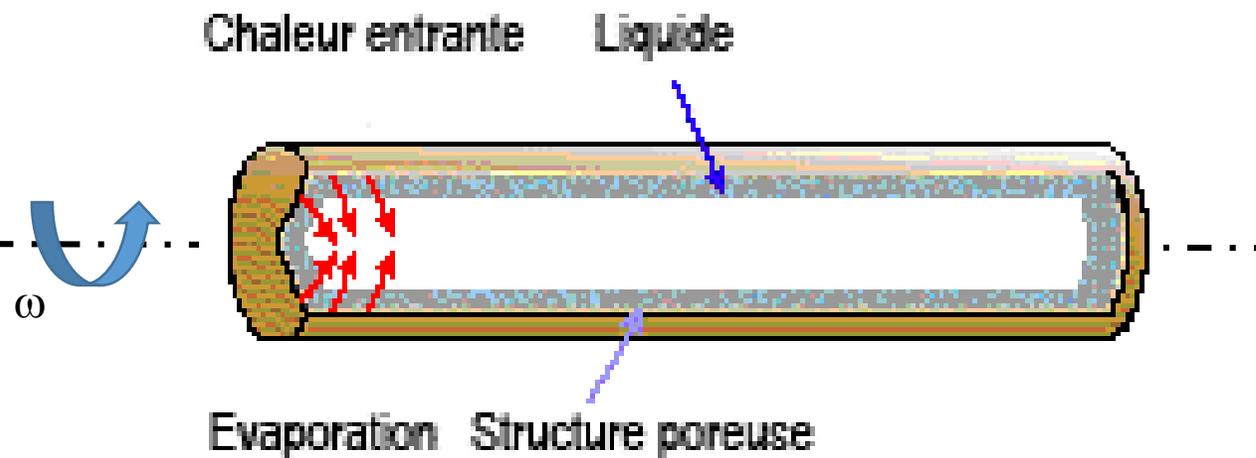


Coefficient de convection
 $h = 50 \text{ W/m}^2, \text{ K}$

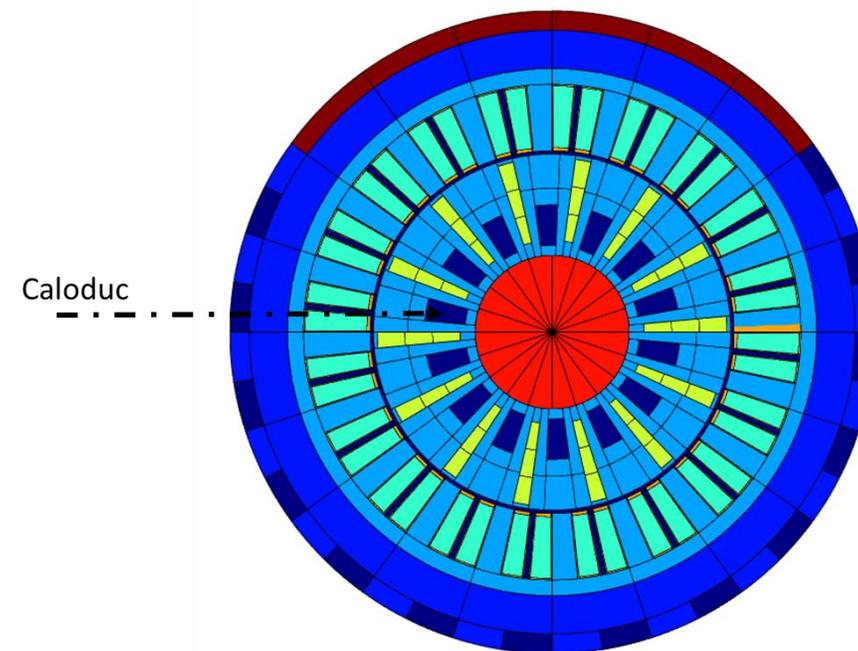
Coupe Rotor/Stator

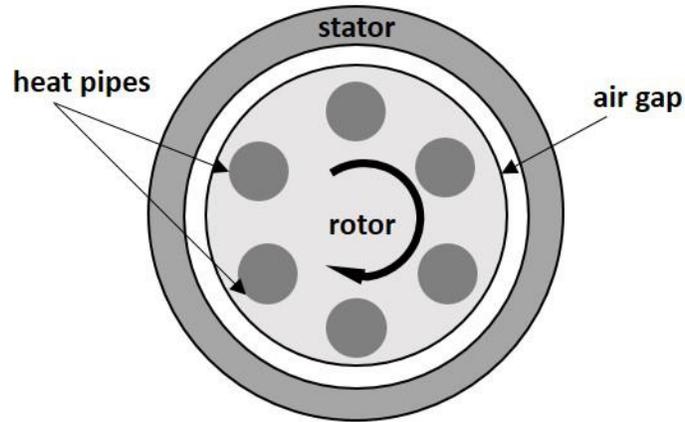
Rotor	Cas de dimensionnement (T en °C)	Cas avec canaux rotoriques (T en °C)	ΔT (en °C)
	85,14	81,4	3,7

Principe de fonctionnement

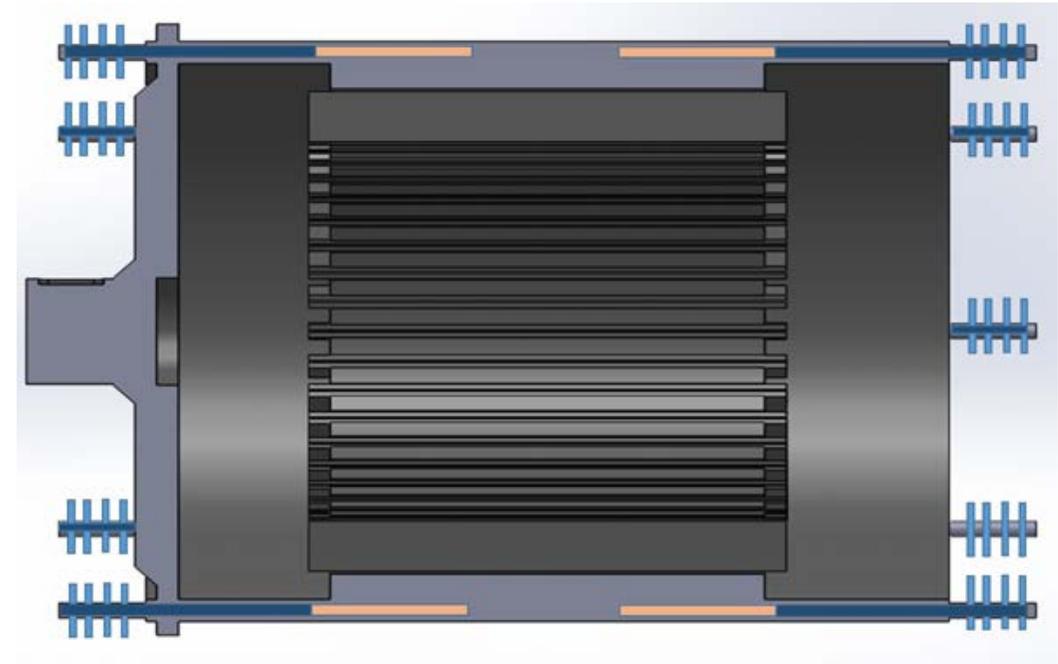
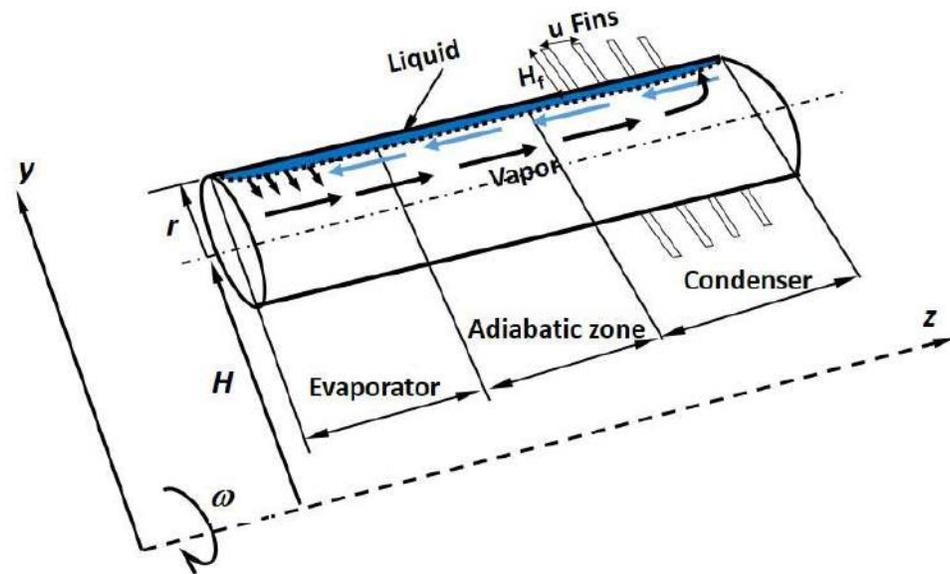


Implantation



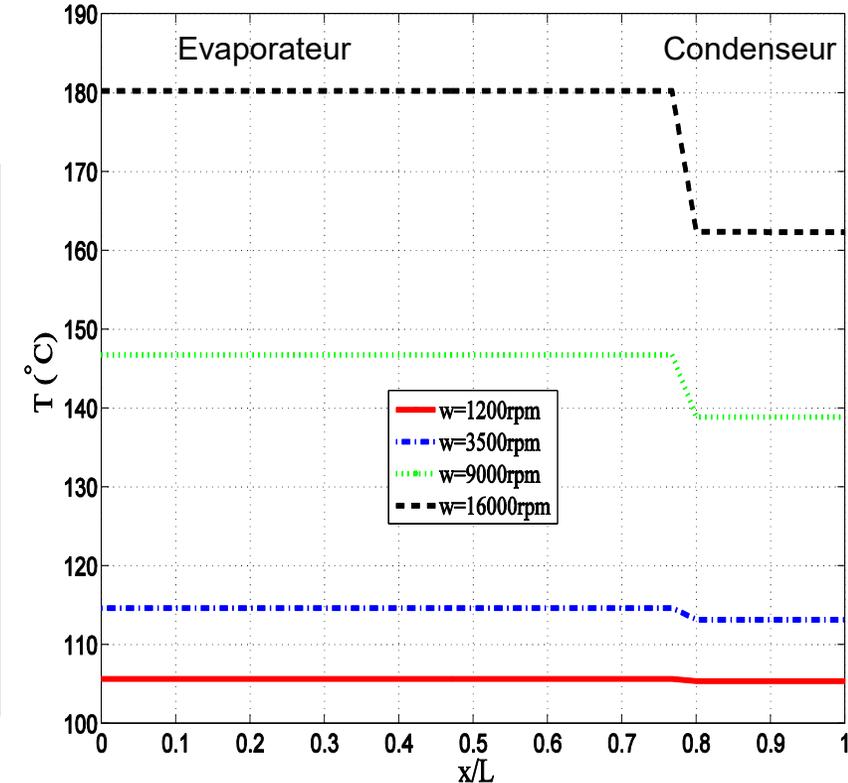
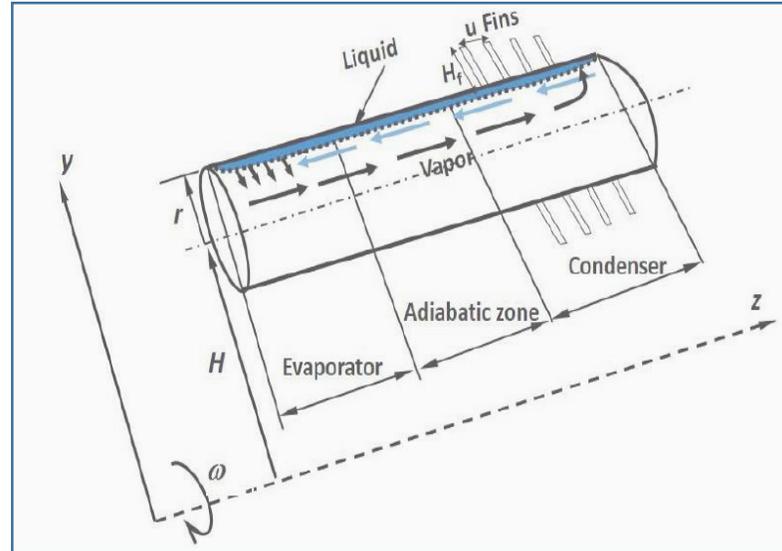
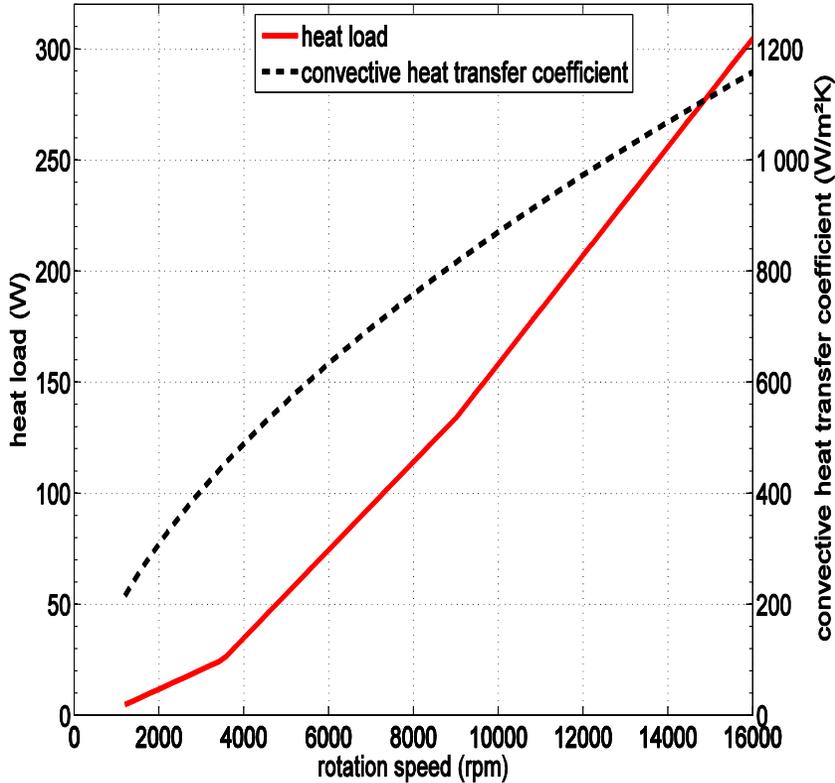


Position des caloducs tournants



- Ω : vitesse de rotation
- H : distance entre l'axe de rotor et l'axe de caloduc
- R : rayon de caloduc
- H_f : longueur des ailettes
- U : espacement entre les ailette
- T_{sf} : Température de la source froide

Géométrie initiale $H : 25 \text{ mm}$ $u : 2 \text{ mm}$ $T_{sf} : 100 \text{ °C}$ $r : 3 \text{ mm}$ $H_f : 9 \text{ mm}$

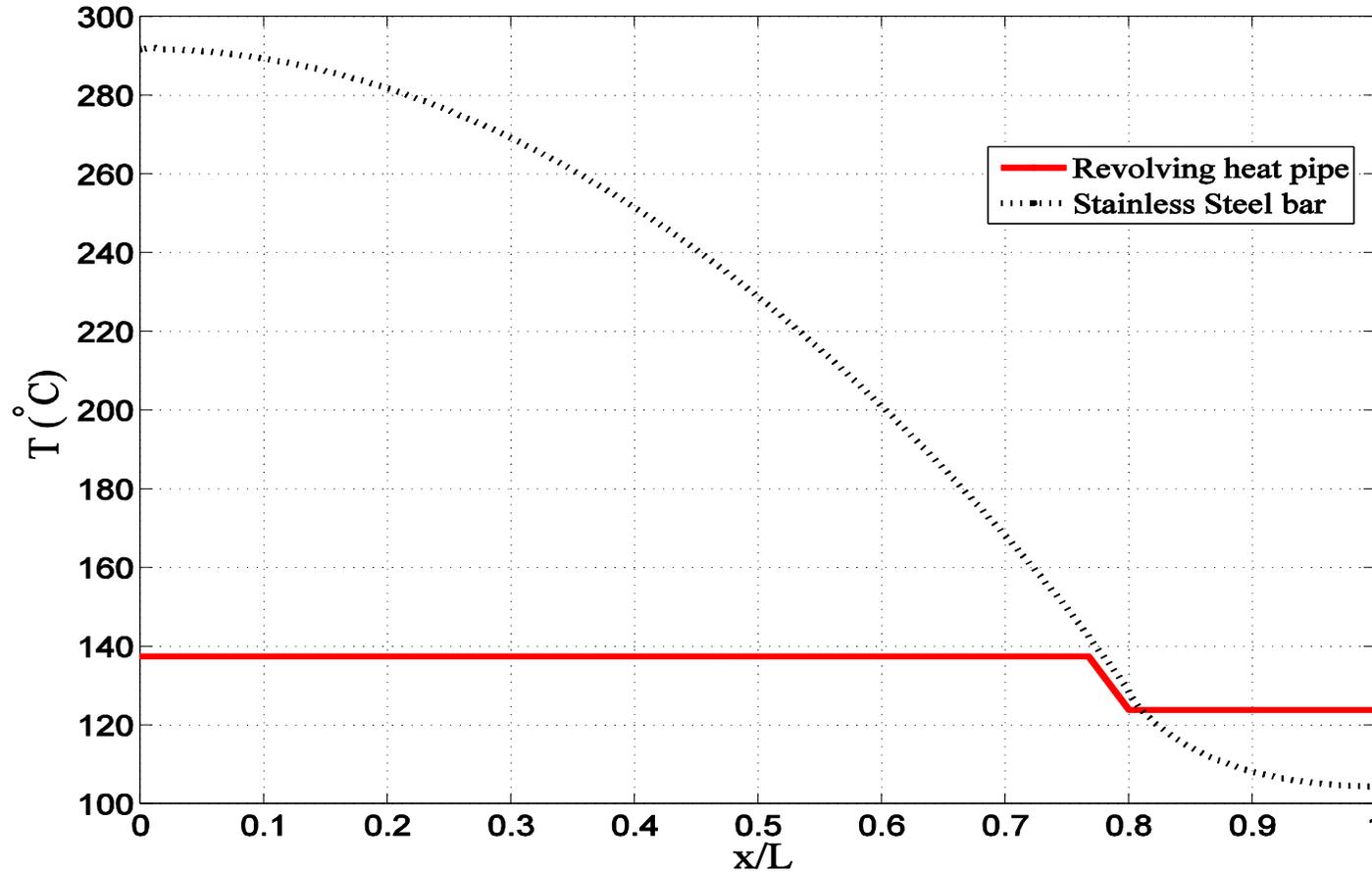


Pertes et Coefficient d'échange convectif au condenseur versus vitesse de rotation

Température versus vitesse de rotation

la température augmente en augmentant la vitesse de rotation
 La température est uniforme dans les régions du condenseur et de l'évaporateur,

Comparaison entre un caloduc tournant et une barre en acier



La température de l'évaporateur du caloduc tournant est toujours inférieure à celle d'une barre en acier inoxydable;
La différence entre les températures de l'évaporateur et de la paroi du condenseur est faible,

Paramètres: distance H, longueur d'ailette H_f , rayon du caloduc r, espacememt entre les ailittes u

Maximiser le flux de refroidissement

$$\phi_C = h_{eq} S_{ech} = \bar{h}_C (2nS_f + S_C) = \frac{\lambda \overline{Nu}}{L_C} (2nS_f + S_C)$$

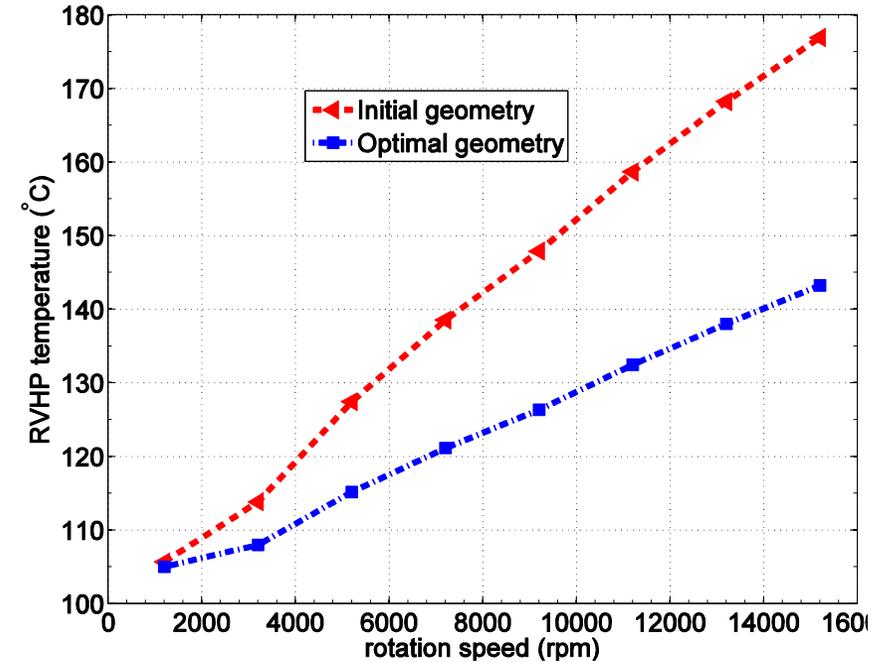
Contraintes: $H + H_f + r < \text{rayon de stator}$

Méthode : Adaptive Particle Swarm Optimization method (APSO)

Les paramètres géométriques optimales

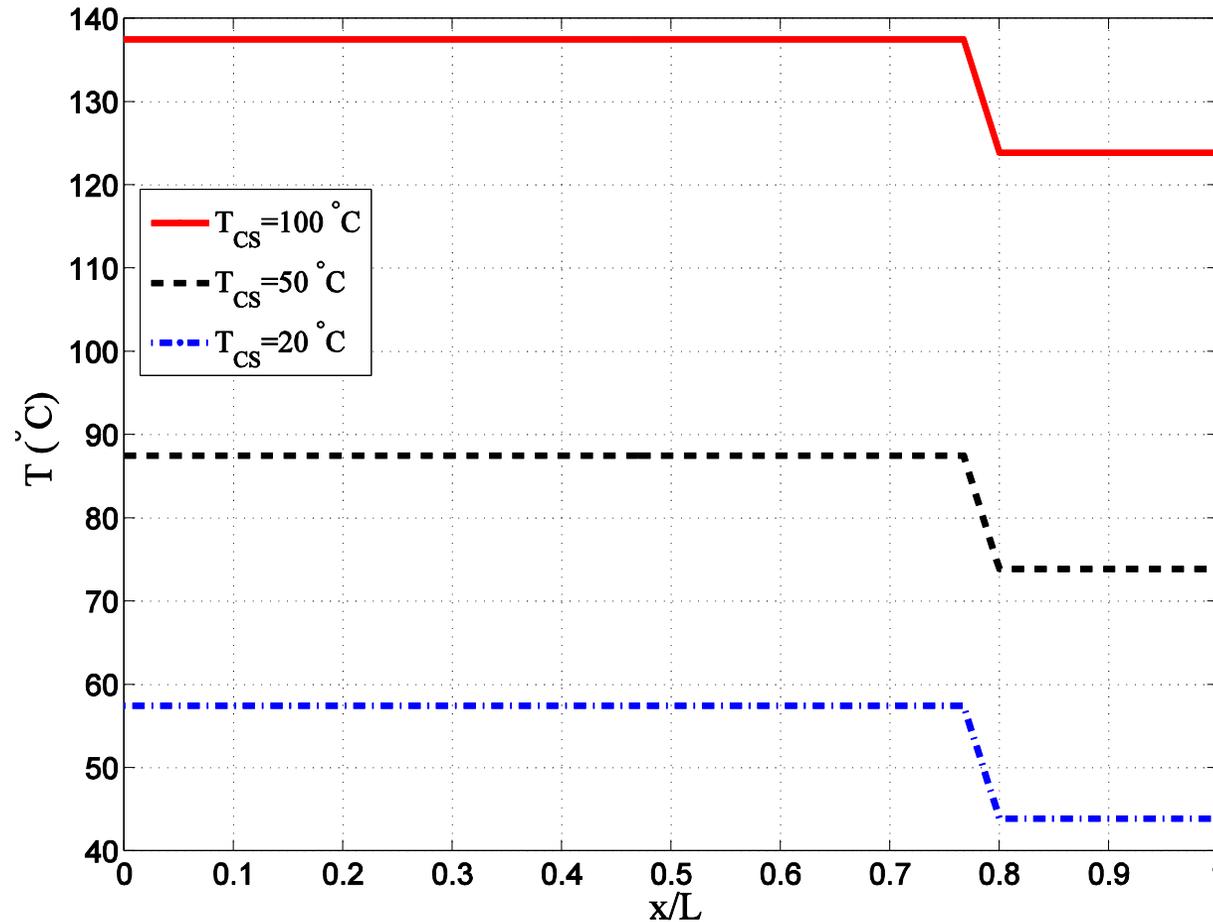
	u (mm)	H_f (mm)	r (mm)	H (mm)	ϕ_C (W/K)
Valeur initiale	2	9	3	25	0,3
Valeur optimale	1	12,75	3	28,25	0,797

Comparaison entre la géométrie initiale et la géométrie optimale



La géométrie optimale améliore les performances thermiques du caloduc tournant.

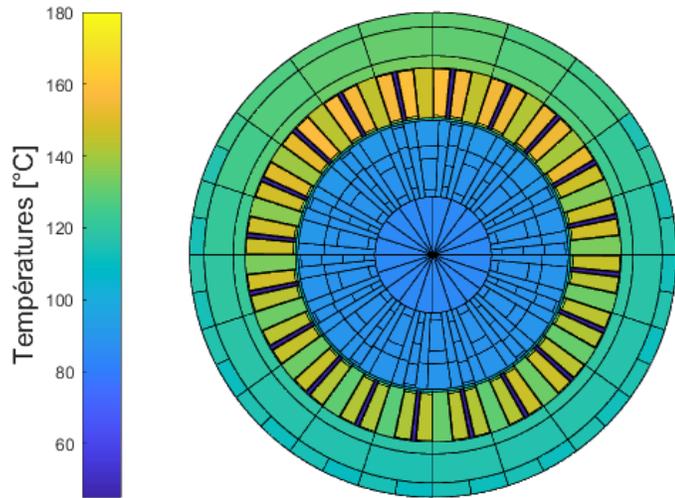
Effet de la température de la source froide pour $\omega = 13000$ tr/mn



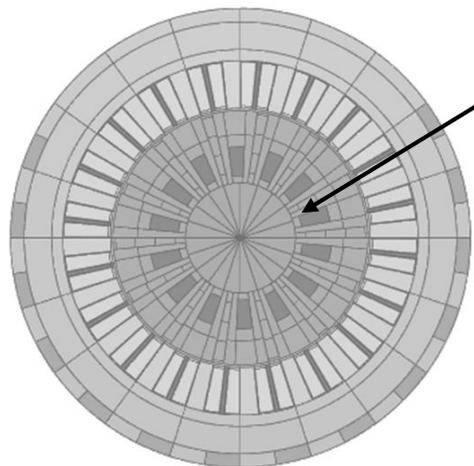
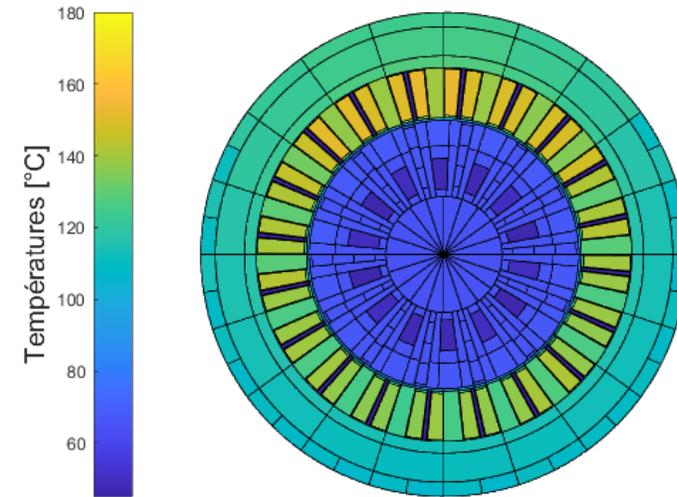
L'augmentation de la température de la source froide entraîne une augmentation de la température du caloduc tournant,

Coupe Rotor/Stator

Cas de dimensionnement



Cas avec caloducs

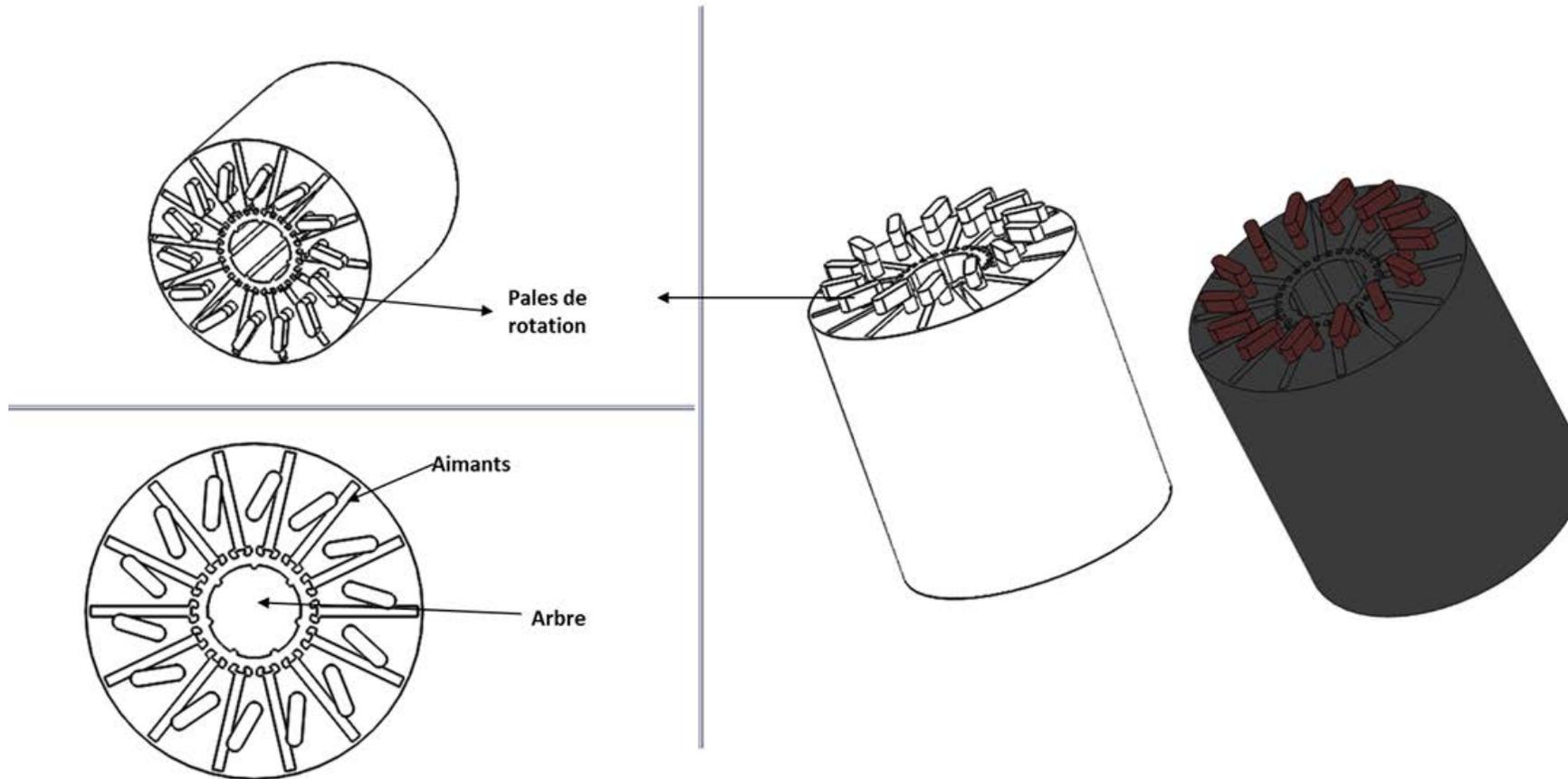


Maille de
comparaison

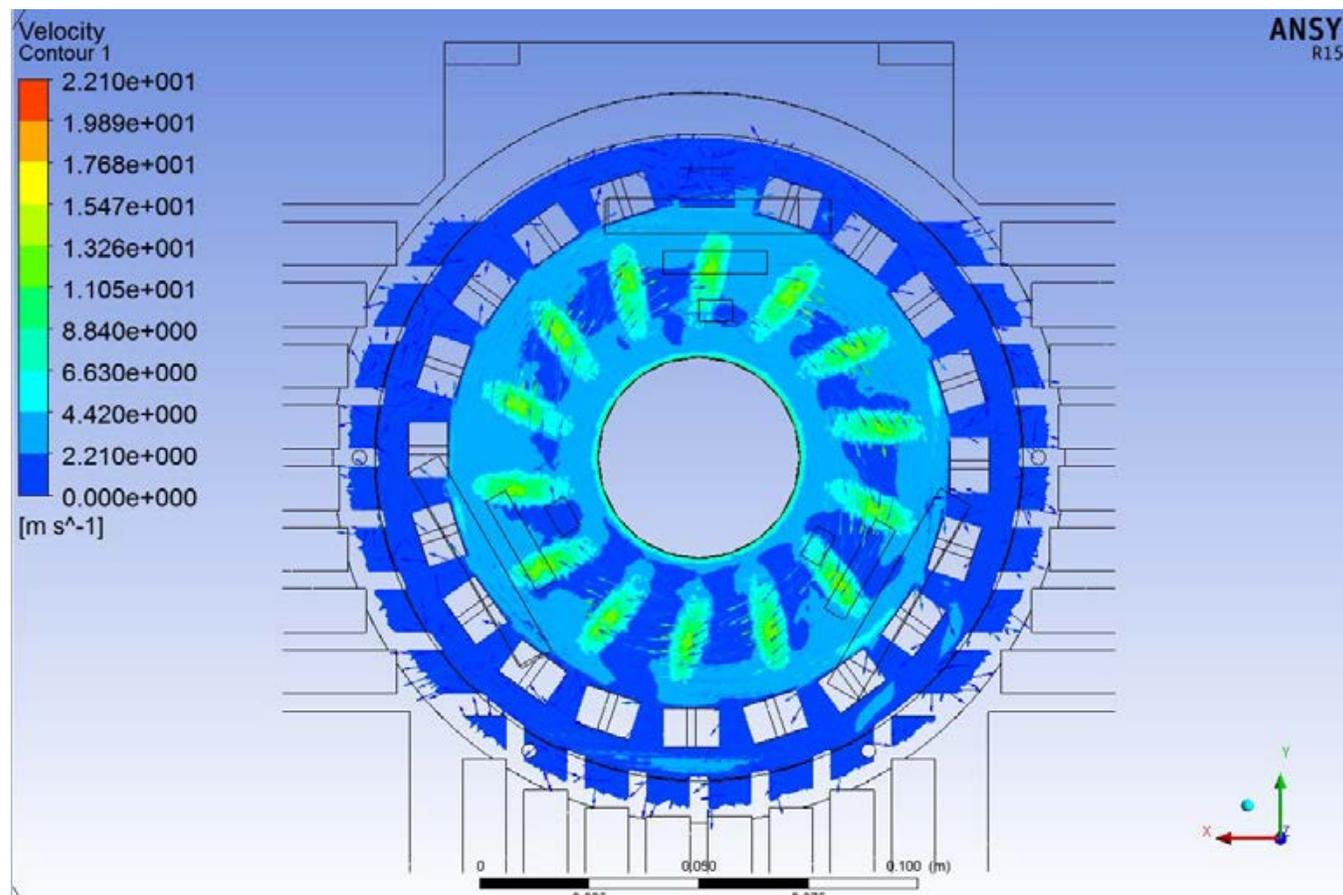
Rotor	Cas de dimensionnement (T en °C)	Rotor avec caloducs tournants (T en °C)	ΔT
	85,14	74,7	10,4

Rappelons que les pertes dans le rotor restent relativement faibles,
Difficile de voir nettement l'influence de l'implantation des caloducs,

Remplacement du brasseur par des pales places sur la position optimale des caloducs



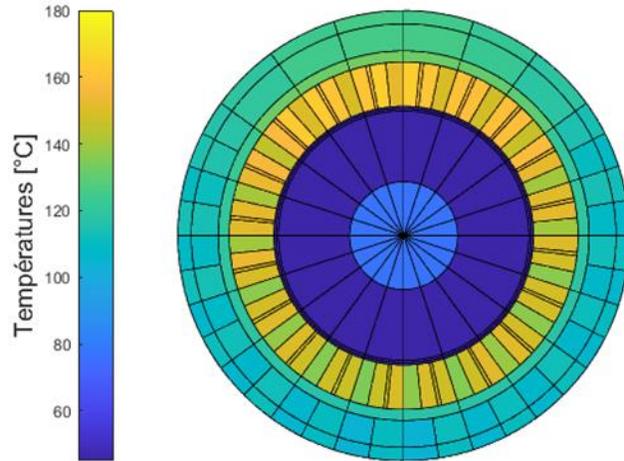
Structure de l'écoulement



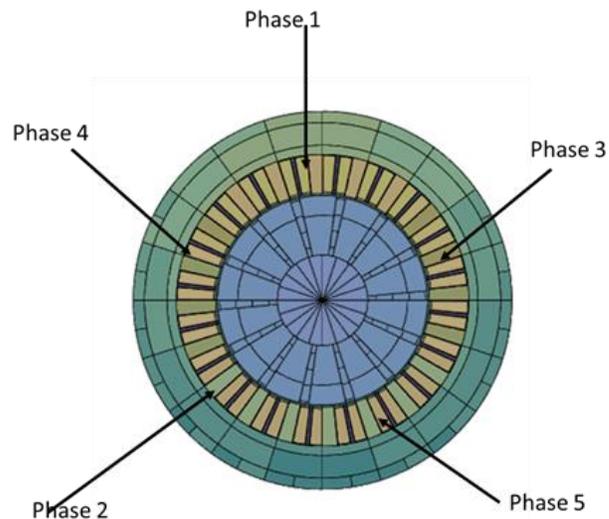
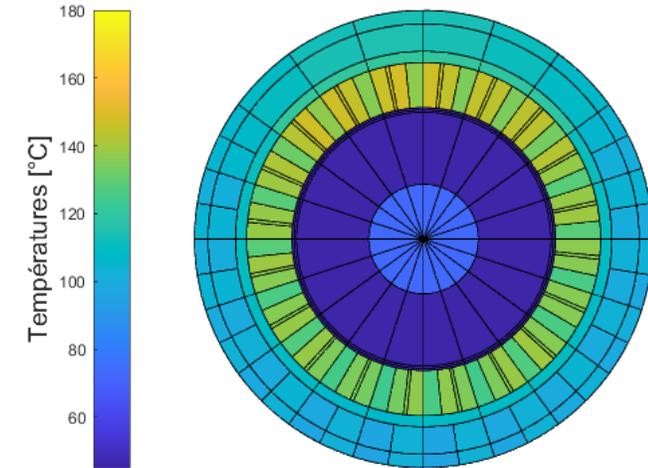
	Debit (L/s)
Q in1	17,15
Q in2	-10,2
Q ent	1,11

Coupe Tête de bobines

Cas de dimensionnement



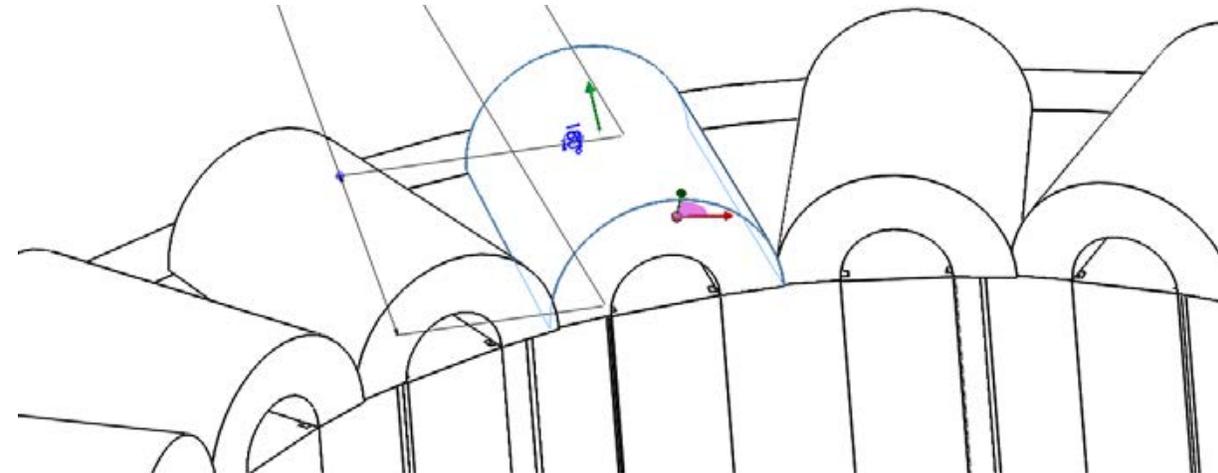
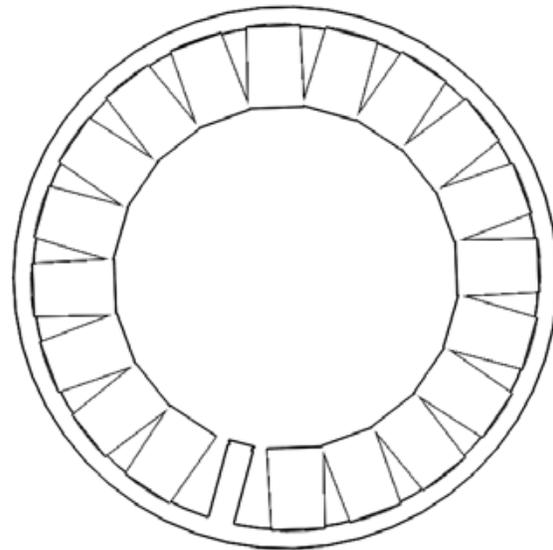
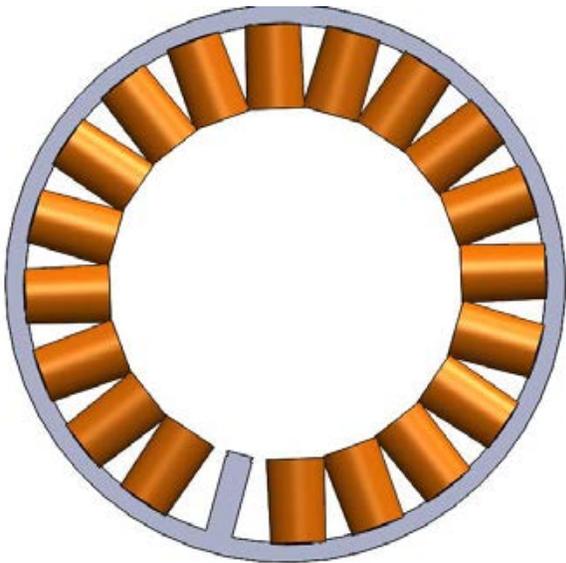
Cas des pales rotoriques



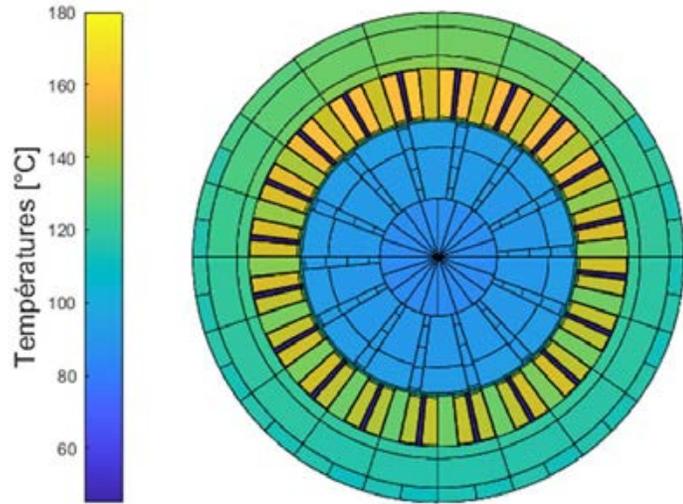
Phase	Cas de dimensionnement (T en °C)	Rotor avec pales rotoriques (T en °C)	ΔT
1	158,2	148,7	9,5
2	149,2	136,5	12,7
3	152,01	139,4	12,61
4	151,8	140,5	11,3
5	148,5	136,3	12,2

Il existe des ouvertures entre les bobines le long du stator

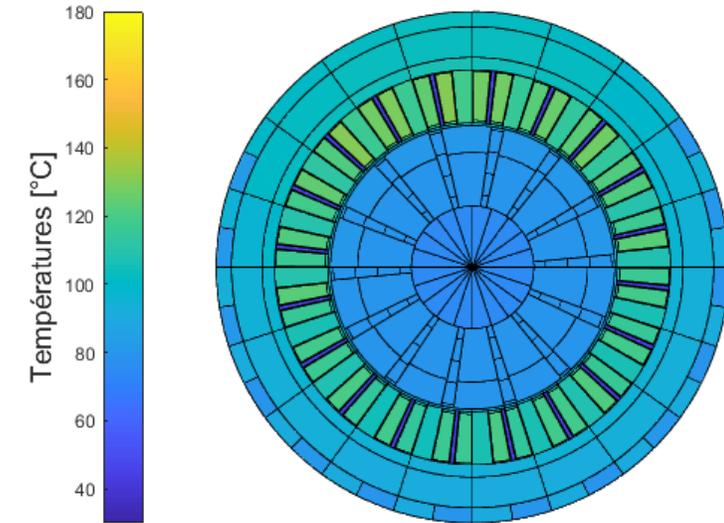
Exploitation de ces espaces pour refroidir la machine



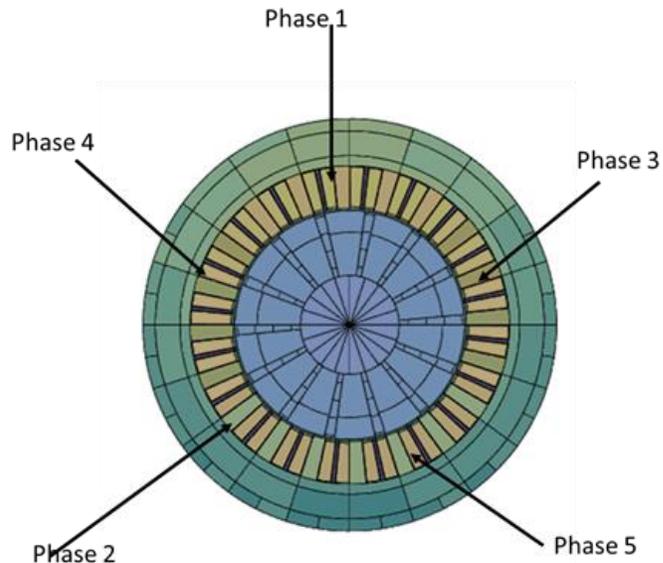
Cas de dimensionnement (coupe R/S)



Convection dans les ouvertures stator (coupe R/S)



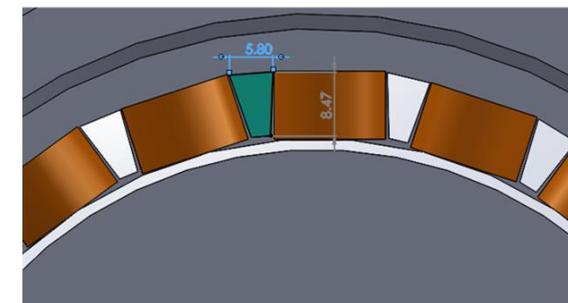
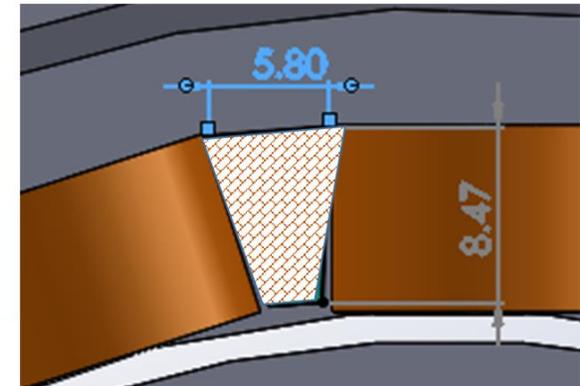
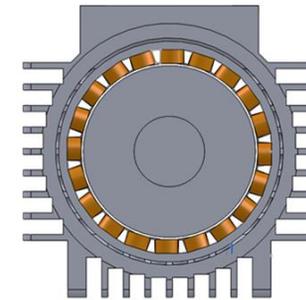
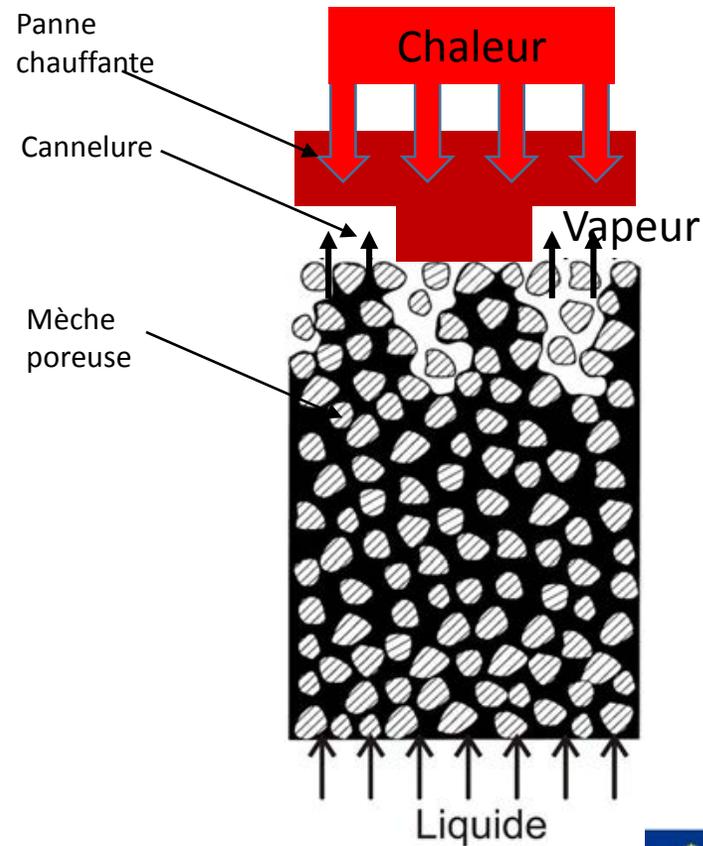
Coefficient de convection
 $h = 50 \text{ W/m}^2, \text{K}$



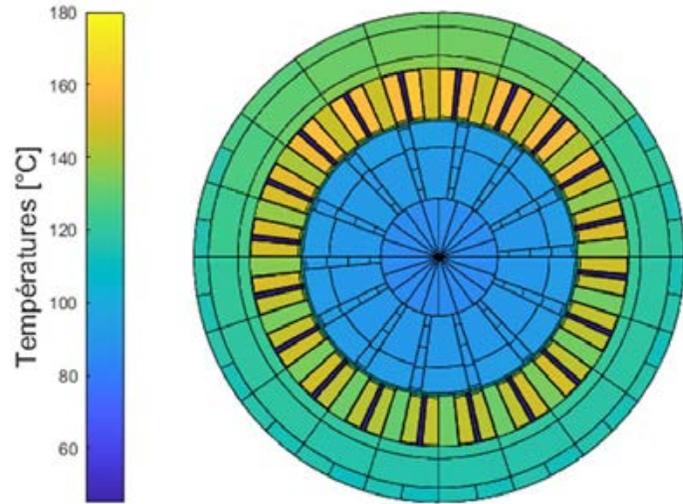
Phase	Cas de dimensionnement (T en °C)	Convection dans les ouvertures statoriques (T en °C)	ΔT
1	158,2	142,4	15,8
2	149,2	134,7	14,5
3	152,01	136,8	15,21
4	151,8	137,02	14,78
5	148,5	134,2	14,3

Principe de fonctionnement

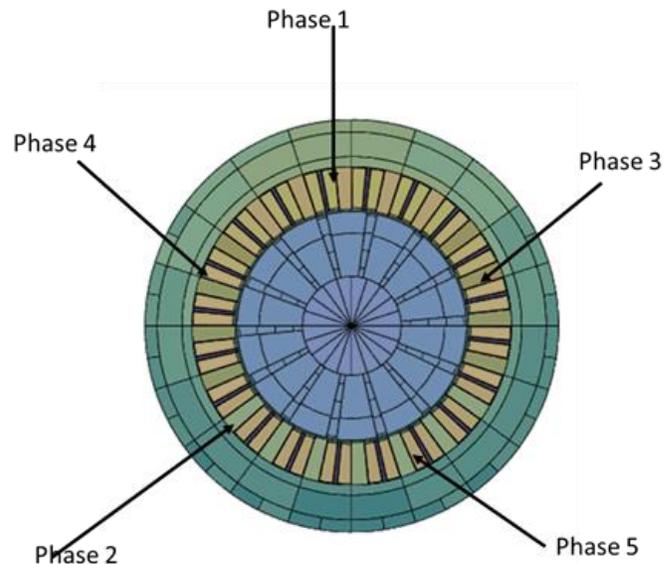
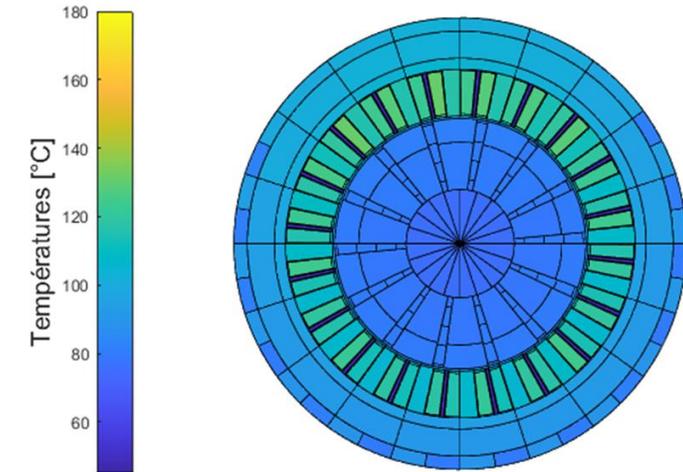
Le changement de phase liquide/vapeur dans un milieu poreux permet de transporter la chaleur dissipée par le stator



Cas de dimensionnement (coupe R/S)



Barres poreuses saturées dans les ouvertures stator (coupe R/S)



Phase	Cas de dimensionnement (T en °C)	Mode ouvertures statoriques (T en °C)	ΔT
1	158,2	139,1	19,1
2	149,2	130,1	19,1
3	152,01	134,5	17,51
4	151,8	134,7	17,1
5	148,5	129,5	19

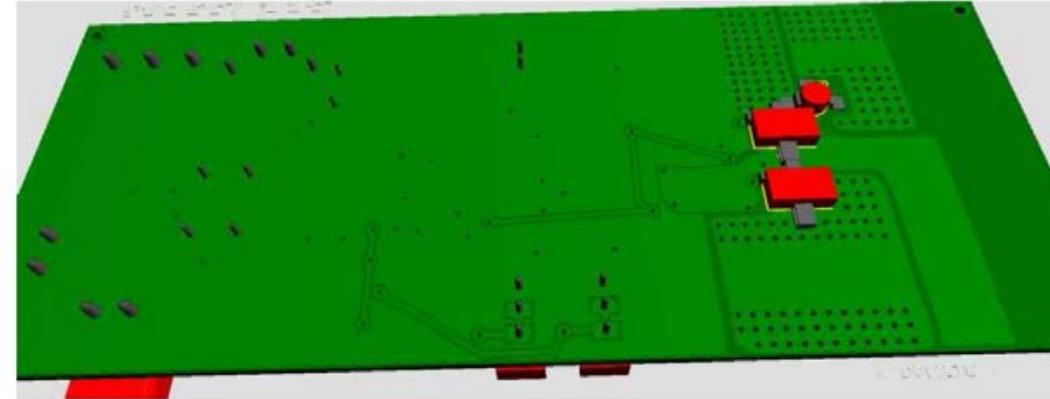
Caractéristiques des transistors

Deux transistors GaN à refroidir

Puissance totale : **70 W**

Surface à refroidir : **3,1X 5,9 mm**

Densité de flux maximale : $250 \frac{W}{cm^2}$



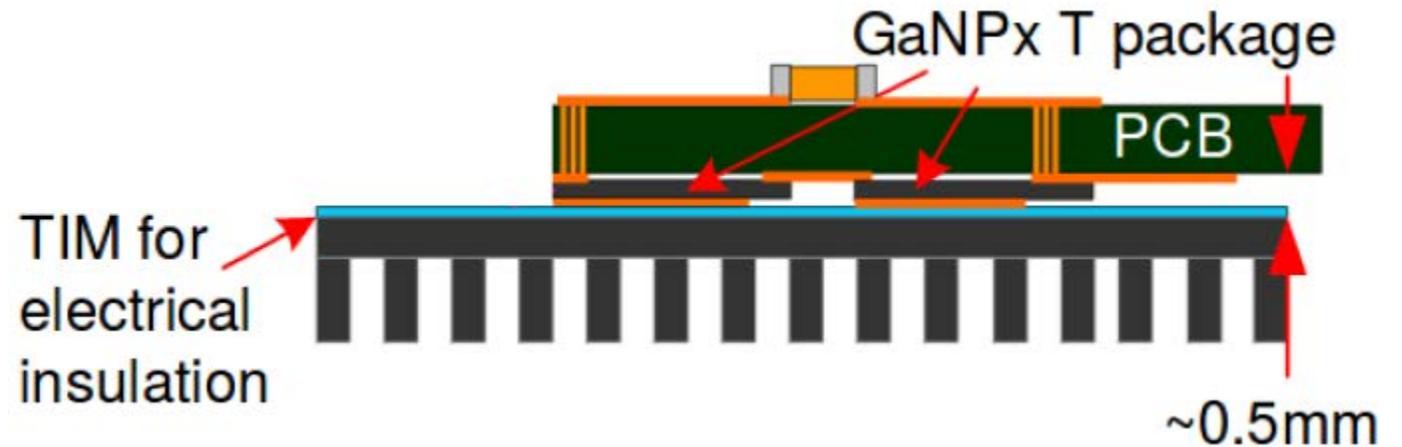
Caractéristiques de la TIM

Il doit être un isolant électrique

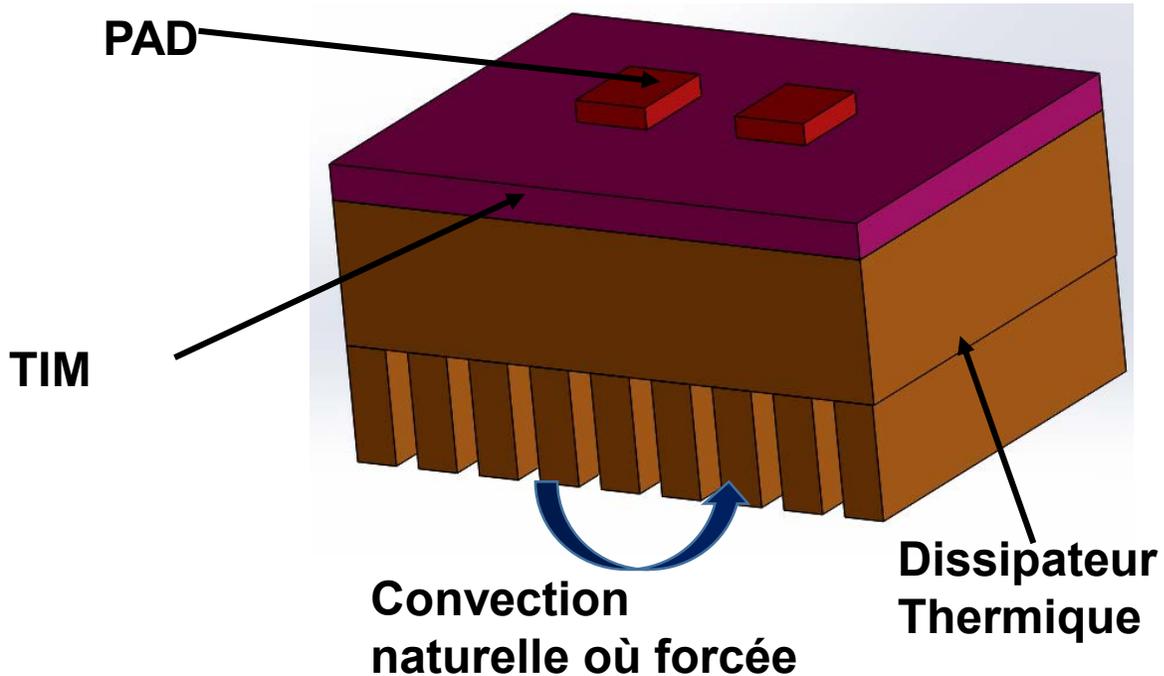
Dissipateur Thermique

Matériau : aluminum

Dimensions : 60X60X25 mm



Configurations testées

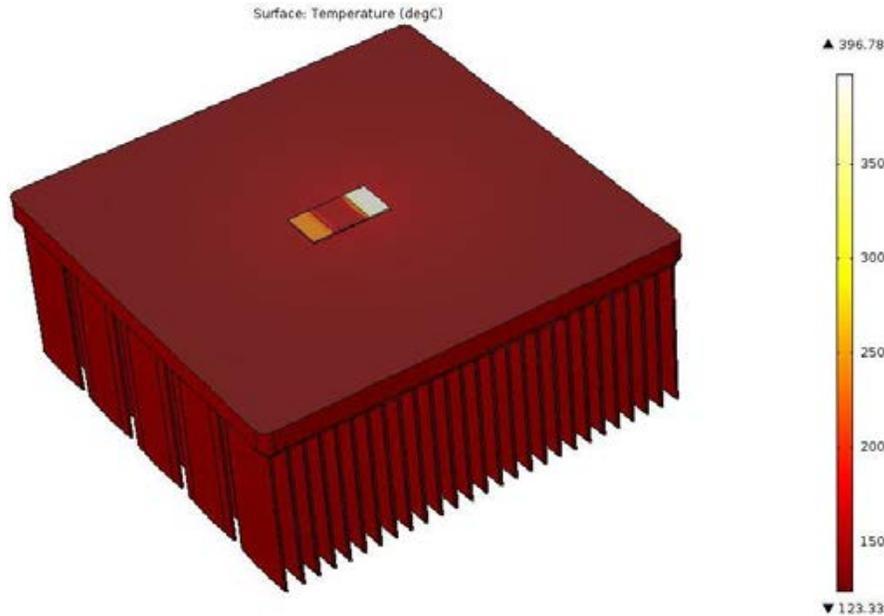


Component	Hi-Flow 300P	Sil-Pad® 1500ST	GAP3000S3 OR	Mica
Fabricant	Bergquist	Bergquist	Bergquist	AAVID
Thermal Conductivity (W/m-K)	1,6	1,8	3	0,53
Thickness (mm) available	0,102	0,203	0,254	0,05-0,1

Matériaux d'interface thermique (L2EP)

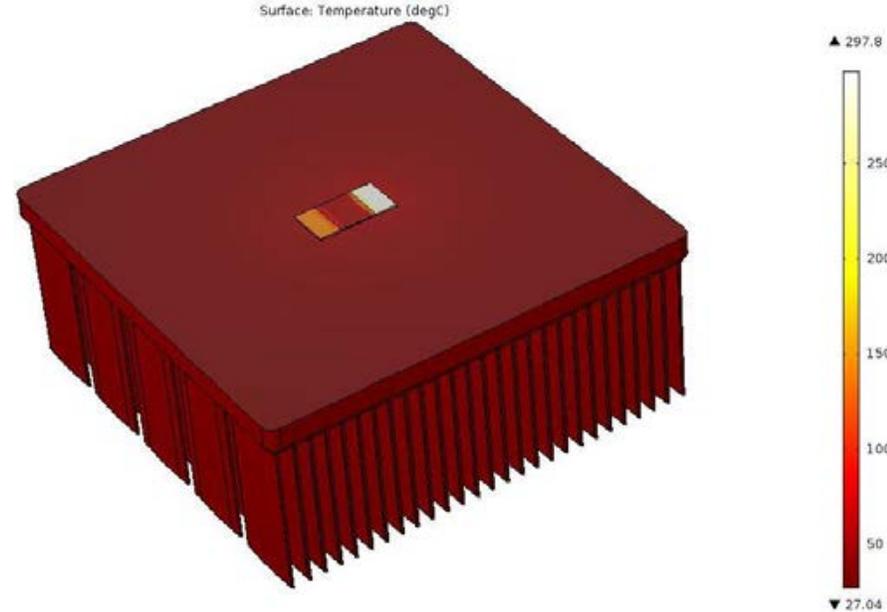
Convection naturelle

$$h_{\text{conv}} = 10 \text{ W/m}^2\text{K} ; T_{\text{ext}} = 293 \text{ K}$$



Convection forcée

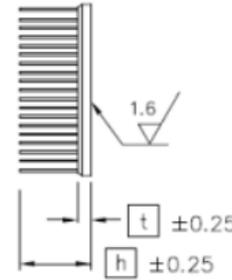
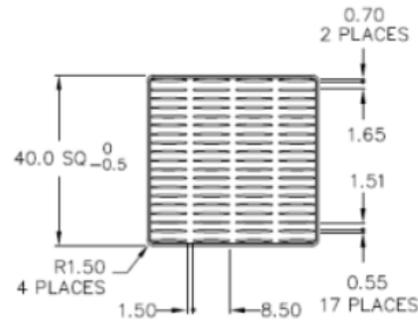
$$h_{\text{conv}} = 100 \text{ W/m}^2\text{K} ; T_{\text{ext}} = 293 \text{ K}$$



La température dépasse toujours 125 C° pour tous les matériaux de TIM étudiés

Température maximale (°C)	Hi-Flow 300P	Sil-Pad® 1500ST	GAP3000S30R
Convection naturelle	393	474	396
Convection forcée	240	375	296

Séparation des 2 composants
Un dissipateur par composant



MATERIAL : A 6063
FINISH : BLACK ANODIZE
DIMENSIONS : mm

Dimensions dissipateur : 40X40X25 mm

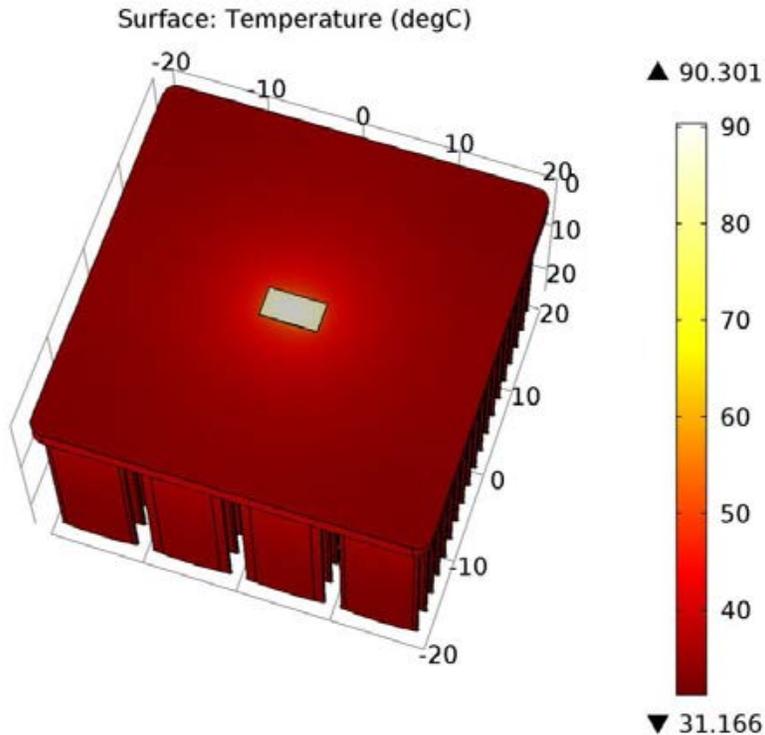
Matériau : Aluminium

Dimensions ailettes : 40X0,55X12 mm

Nombre d'ailettes : 19

Puissance : 35 W

Ventilateur: 60X60X10 mm



$T_{max} = 90 \text{ °C}$

Dimensions dissipateur :
75X65X45 mm

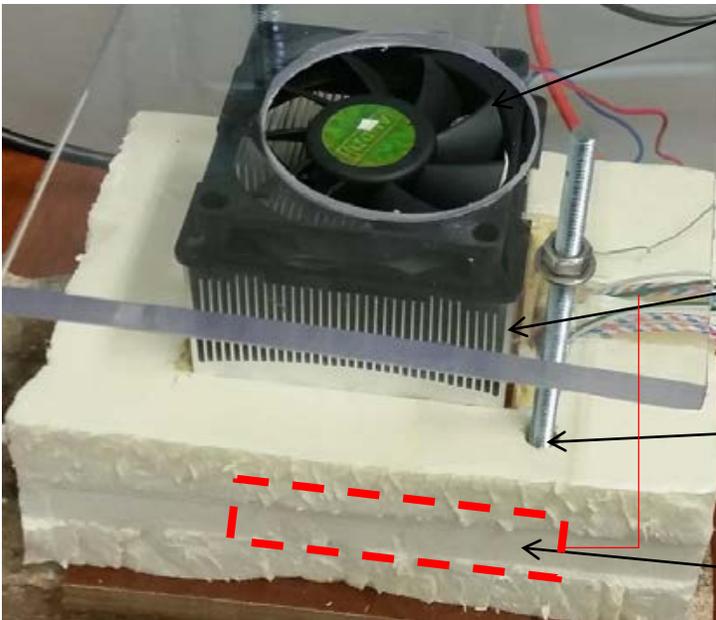
Matériau : Aluminium

Ventilateur: 60X60X10 mm

TIM: TGF-Z1000-SI

Epaisseur TIM= 1 mm

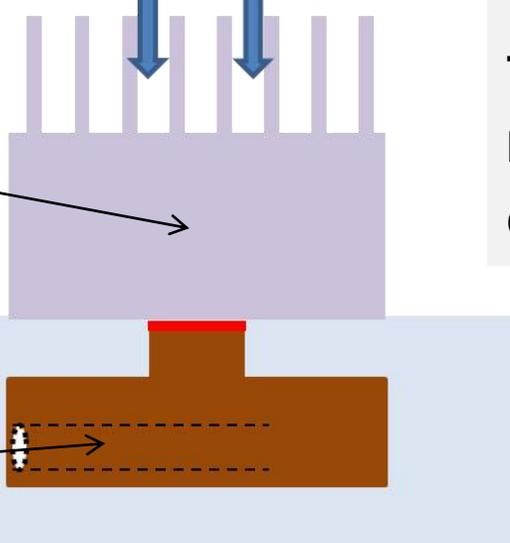
Conductivité TIM= 11W/m/K



Ventilateur

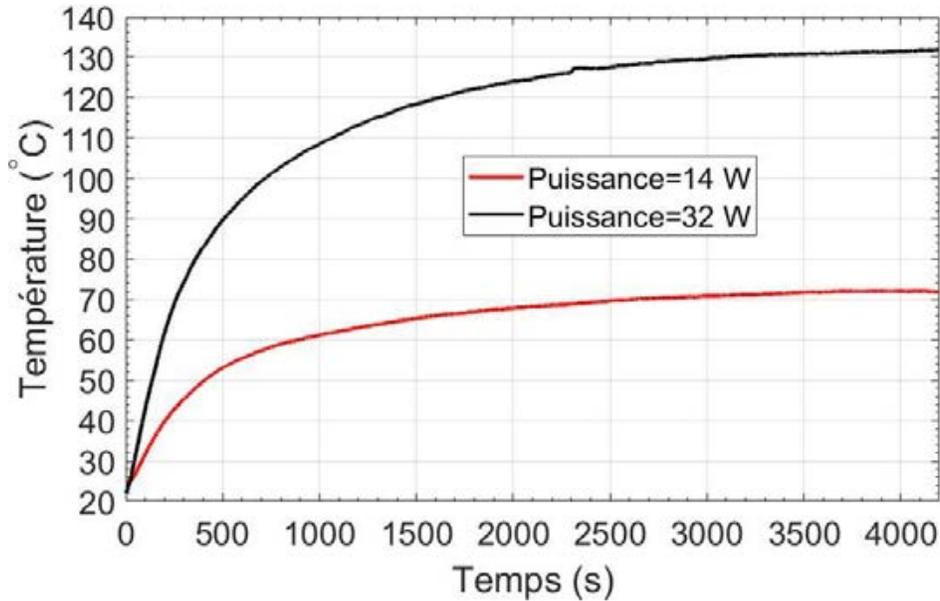


Dissipateur
thermique

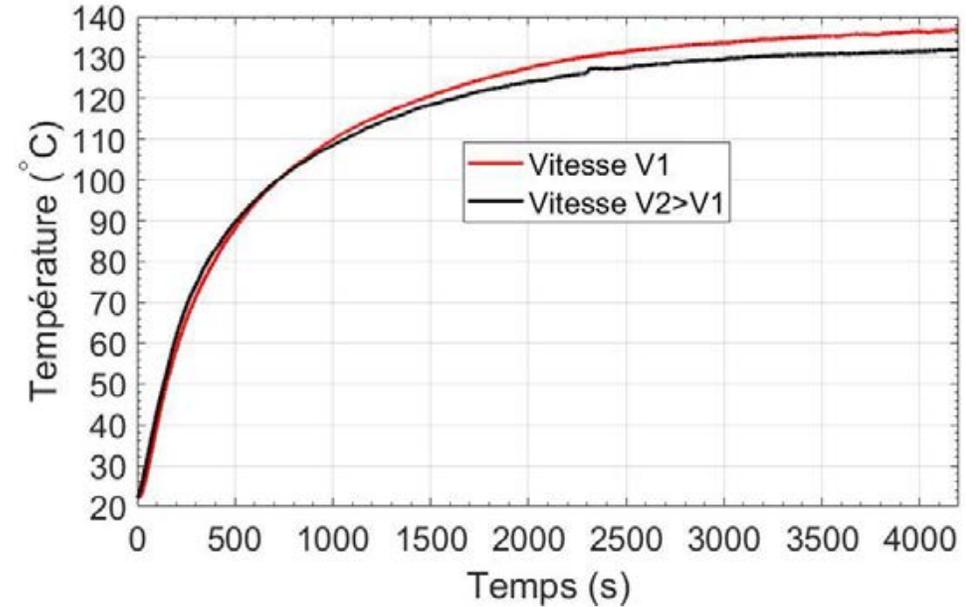


Isolant

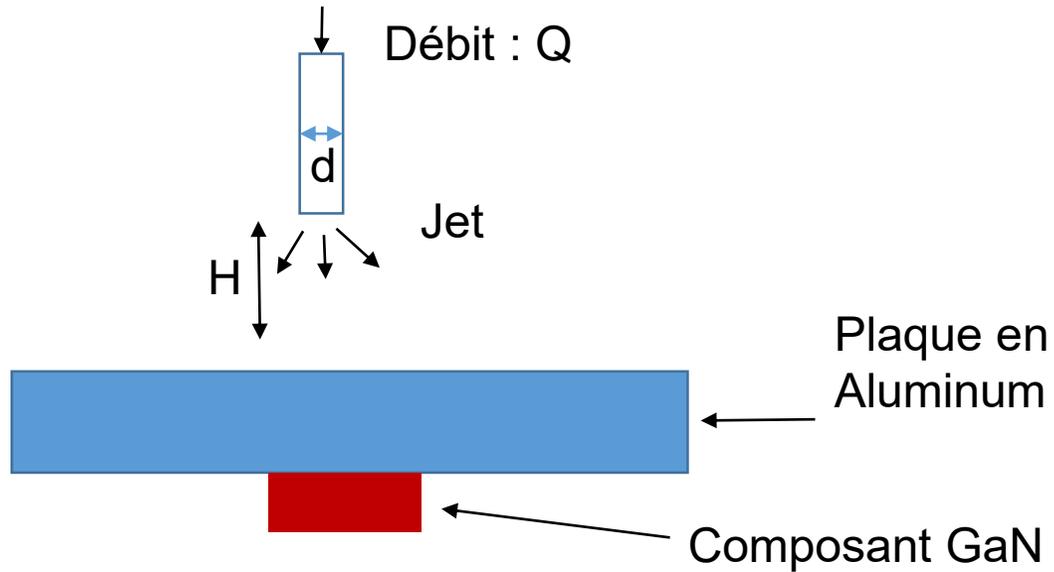
Cartouche chauffante



Température entre l'interface thermique et le bloc de chauffe pour deux puissances appliquées différentes



Température entre l'interface thermique et le bloc de chauffe pour deux vitesses de ventilation



Fluides : air, huile, liquide diélectrique

Paramètres :

Q : débit

d : diamètre de la buse

H : distance entre le jet et la plaque

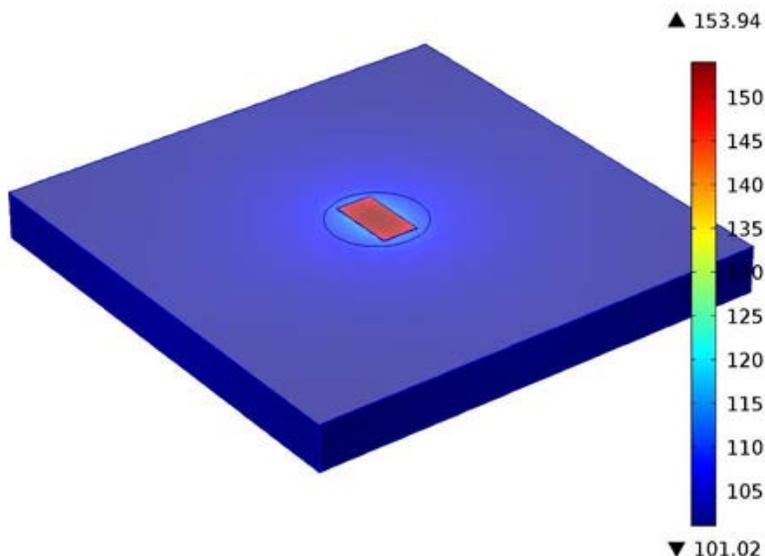
Dimensions de la plaque : 40X40X4 mm ; Epaisseur de la TIM: 0,1 mm ; Conductivité thermique de la TIM : 6 W/m/K

Jet d'air

Q : 20 l/mn ; d : 2 mm ; H : 1 cm

Coefficient d'échange maxi : 670 W/m²/k

Surface: Temperature (degC)

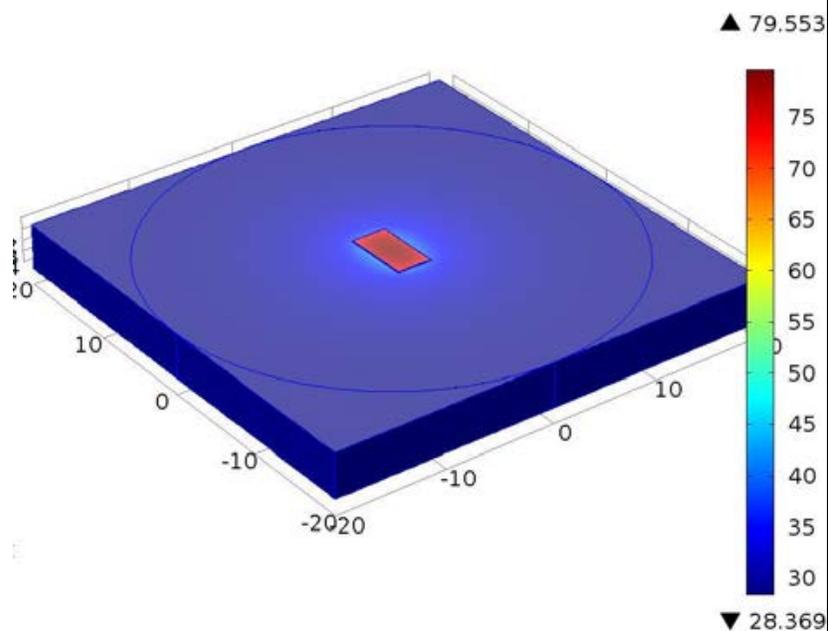


Jet d'huile

Q : 2 l/mn ; d : 5 mm ; H : 1 cm

Coefficient d'échange maxi : 4844 W/m²/K

Surface: Temperature (degC)

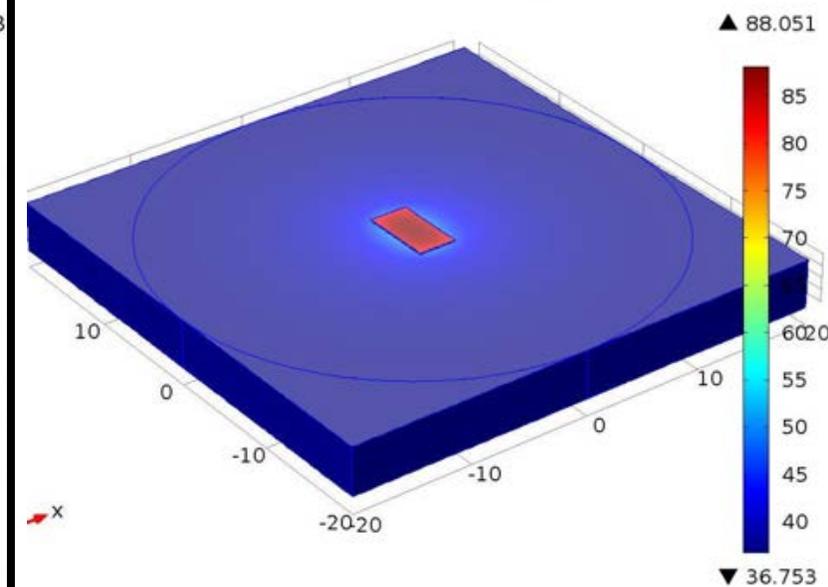


Jet liquide diélectrique

Q : 0,15 l/mn ; d : 3,5 mm ; H : 1 cm

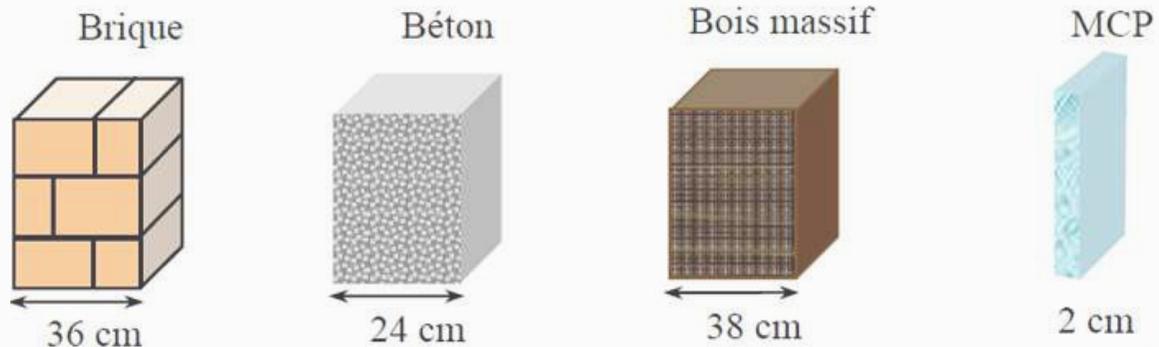
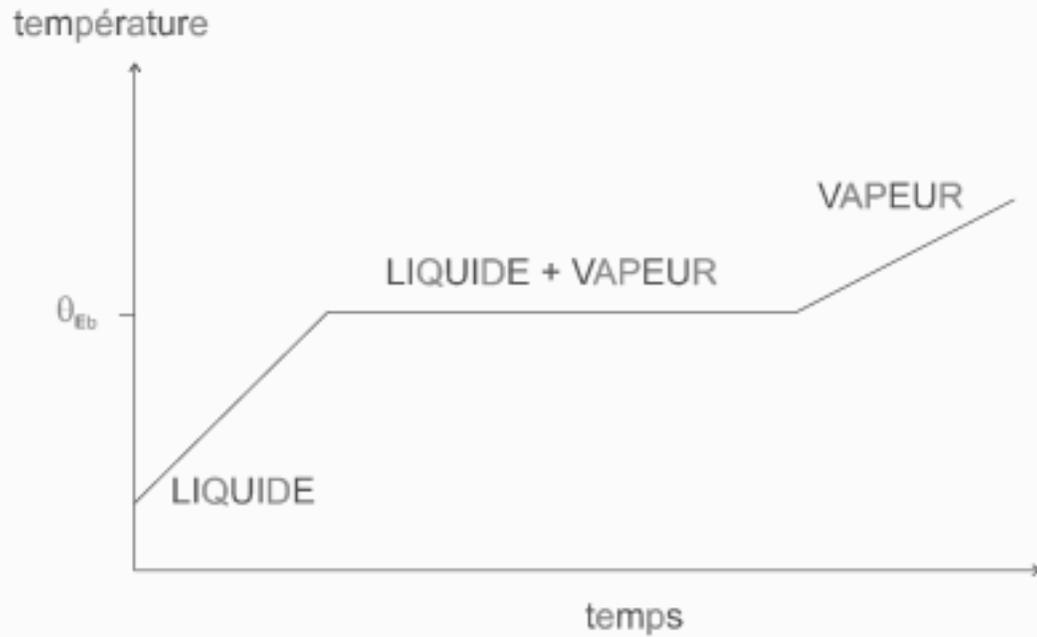
Coefficient d'échange maxi : 2761 W/m²/K

Surface: Temperature (degC)

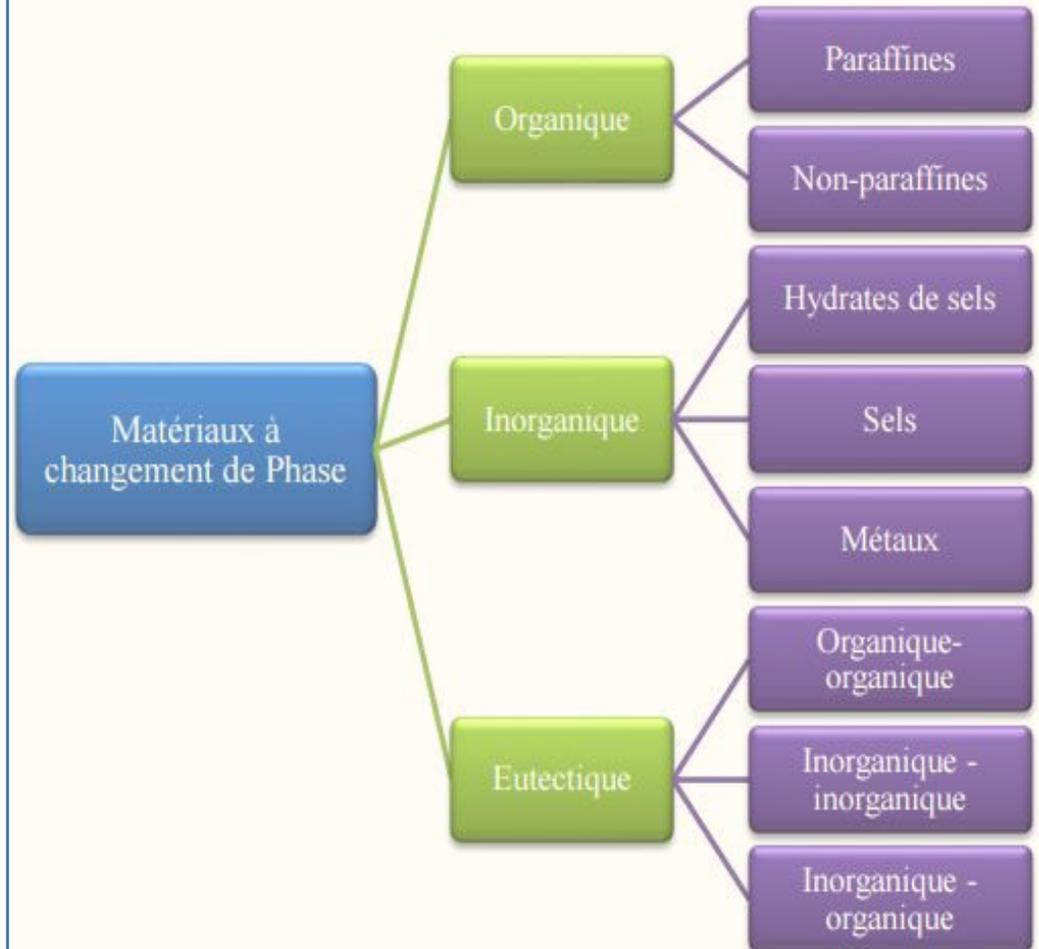


T_{\max} avec jet d'air 150 °C ; T_{\max} avec jet liquide diélectrique 88 °C ; T_{\max} avec jet d'huile 79 °C

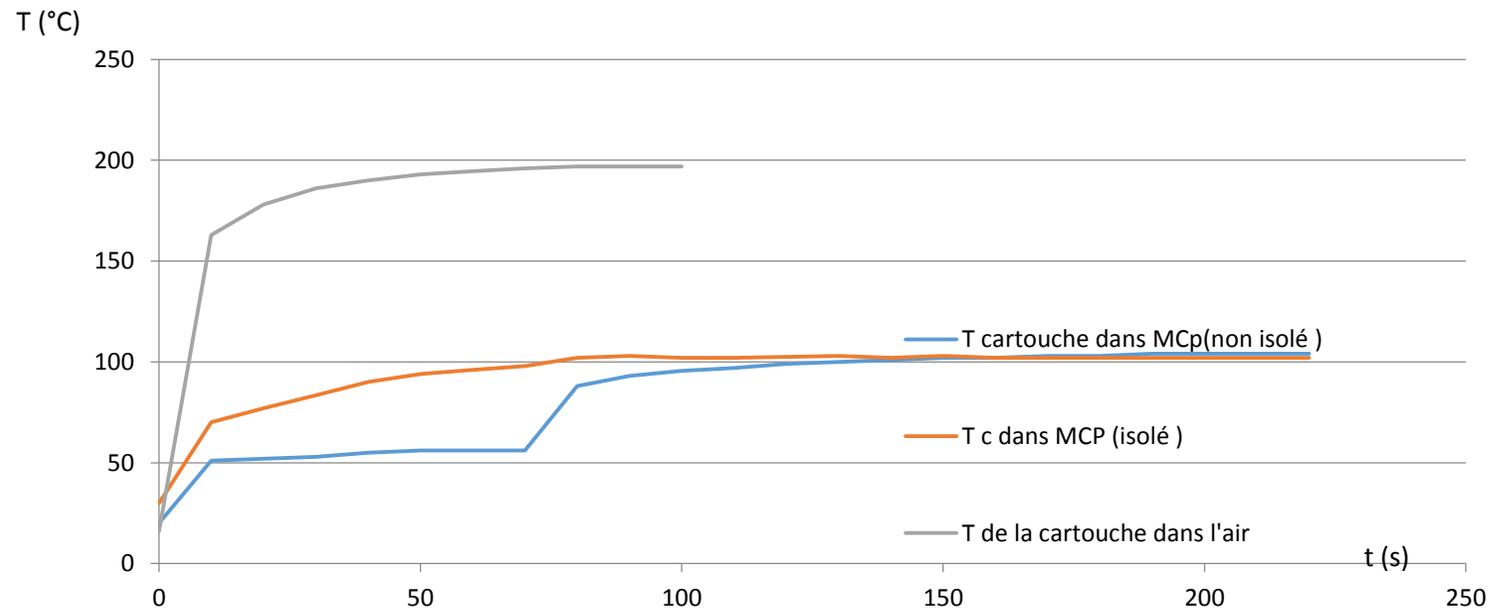
Principe

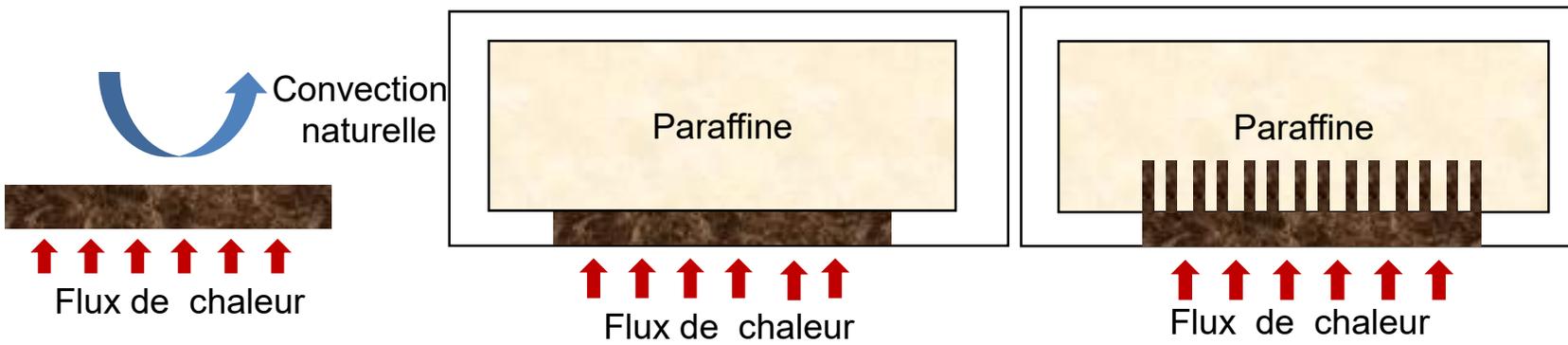


Les matériaux

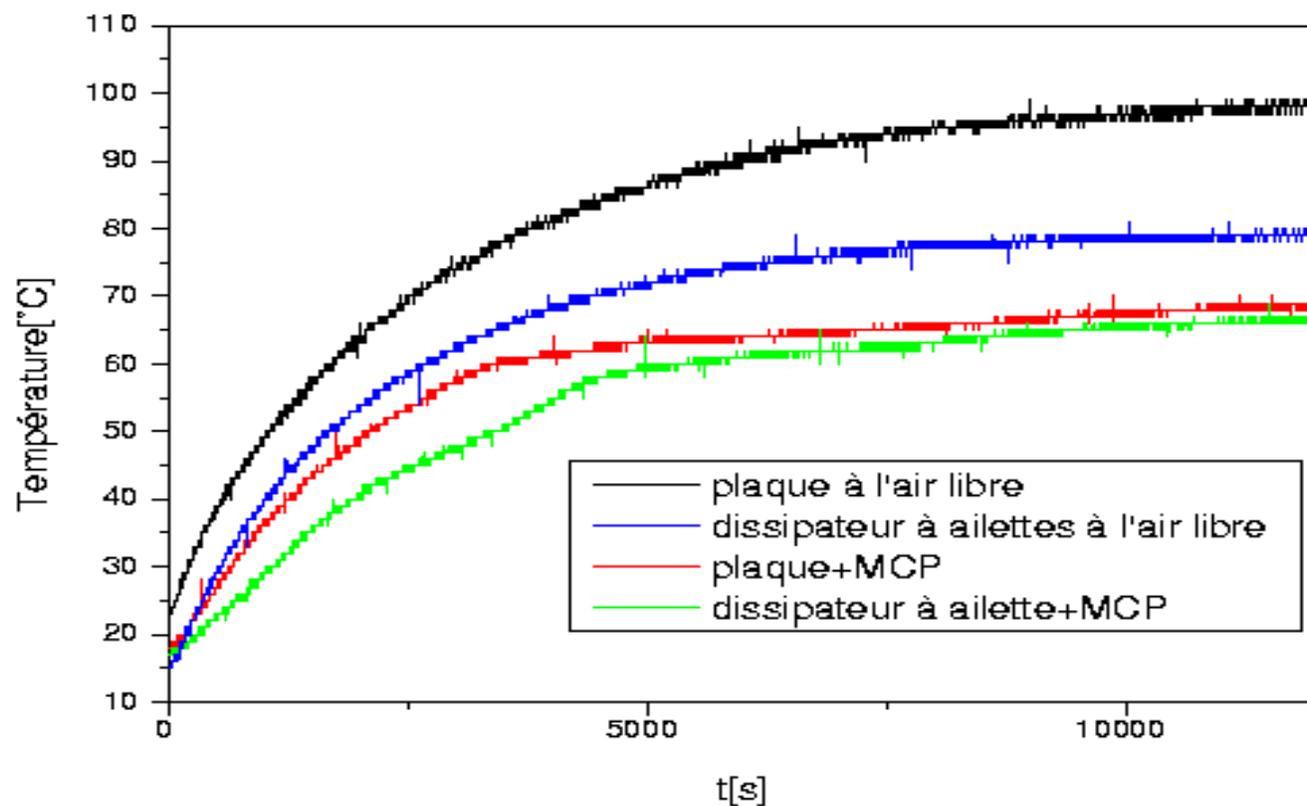
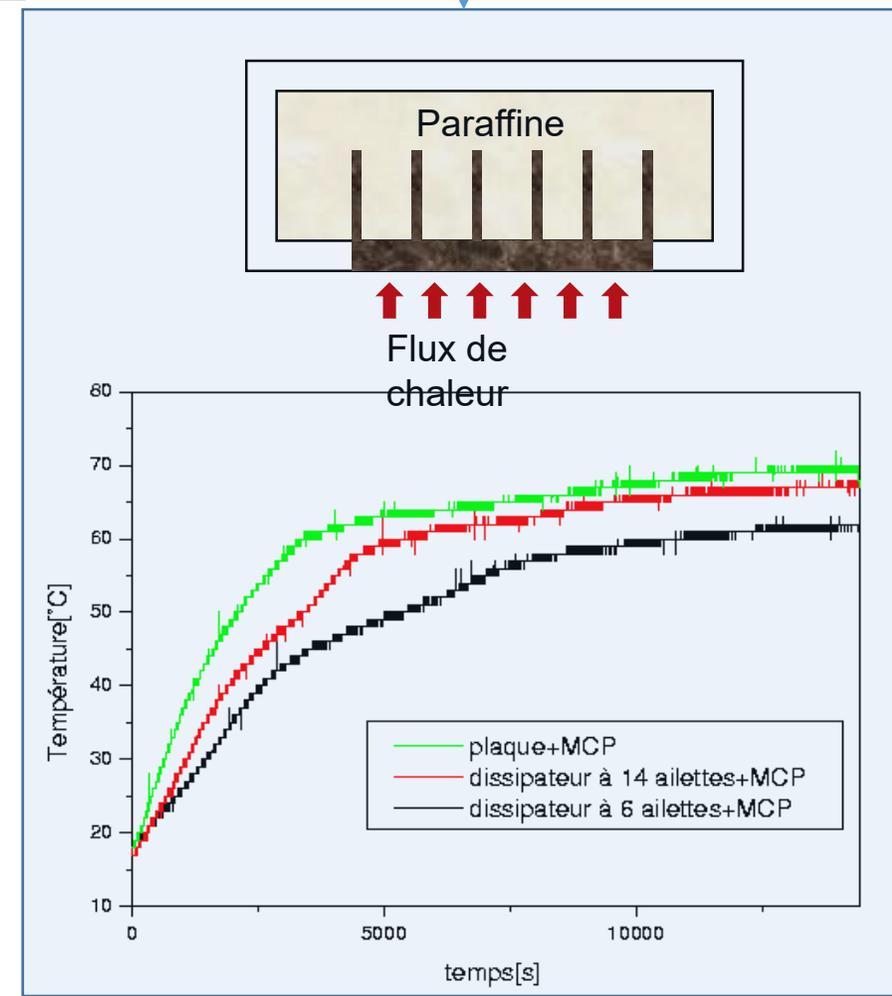


Exemple d'une cartouche chauffante de puissance 3,21 W plongée dans un sel de température de fusion $T_f = 90^\circ\text{C}$

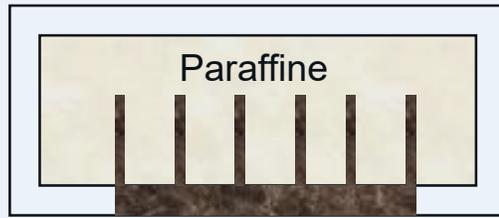




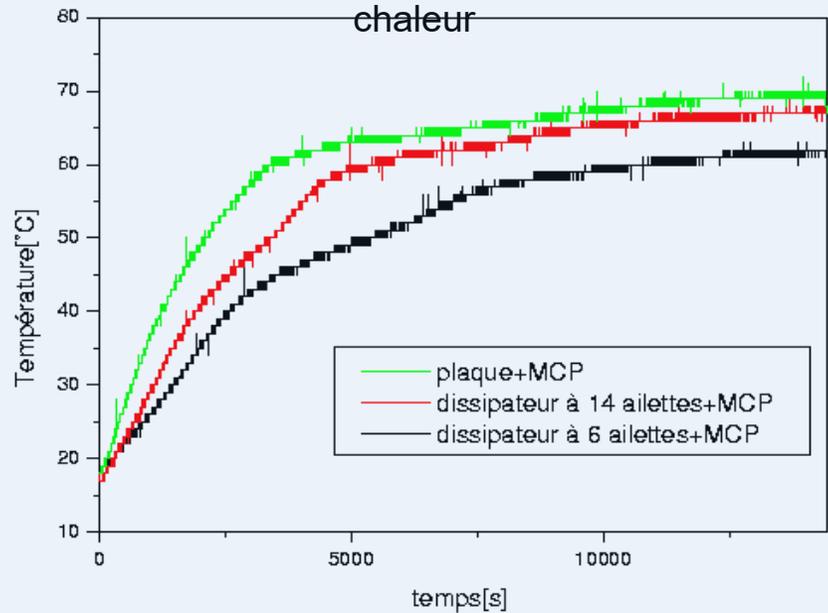
Optimisation des ailettes



MCP + ailettes



Flux de
chaleur



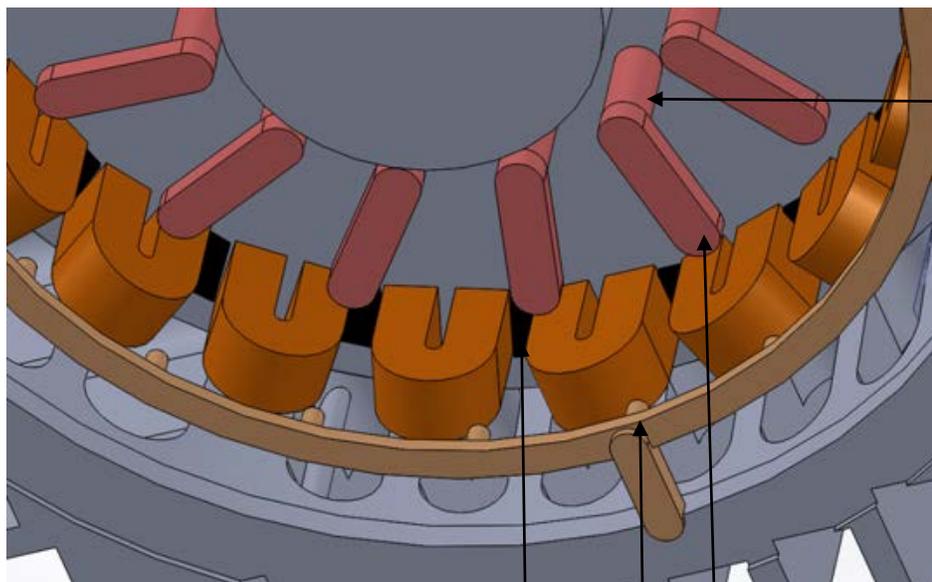
MCP + matrice silicone



MCP + matrice graphite



Schéma de principe de la configuration

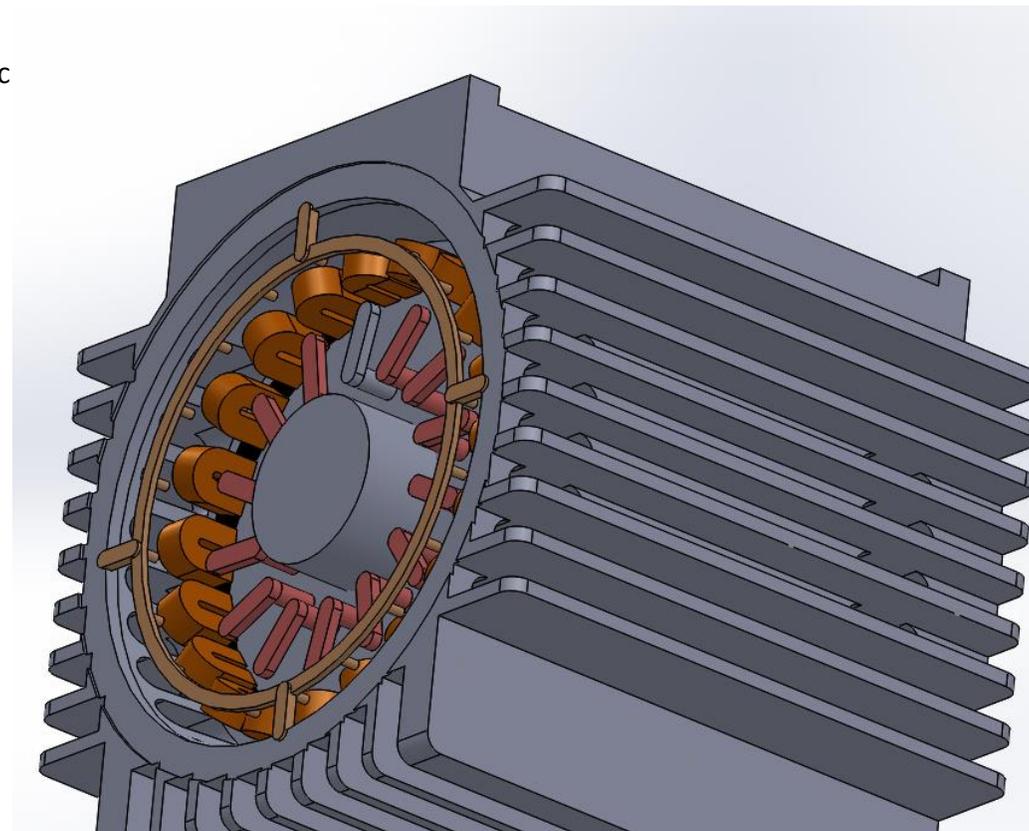


Emplacement caloduc

Barres poreuses

Pales rotoriques

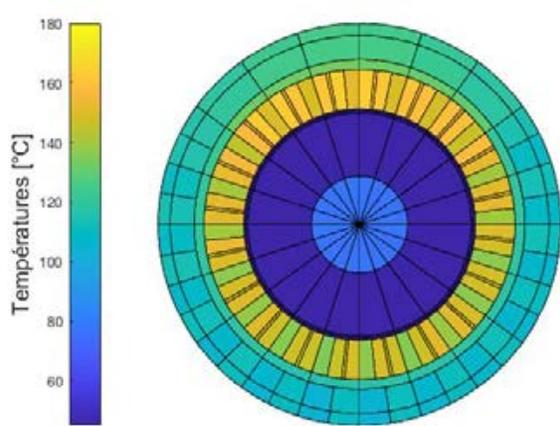
Jet d'huile



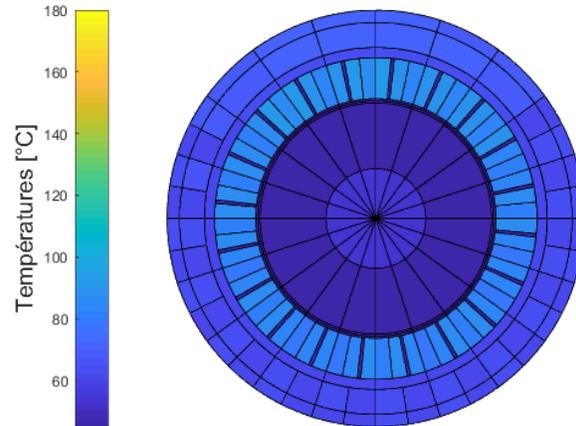
Têtes de bobines coupe 2

Cas de dimensionnement

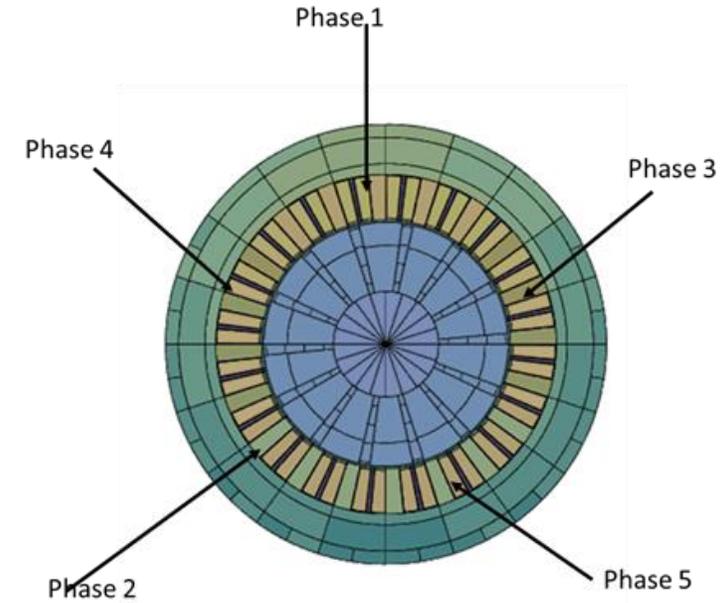
Combinaison des solutions



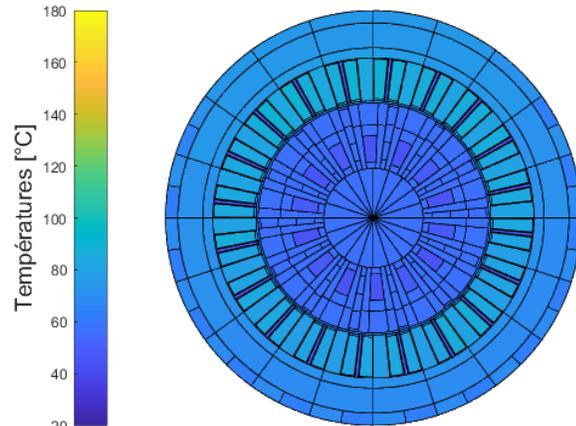
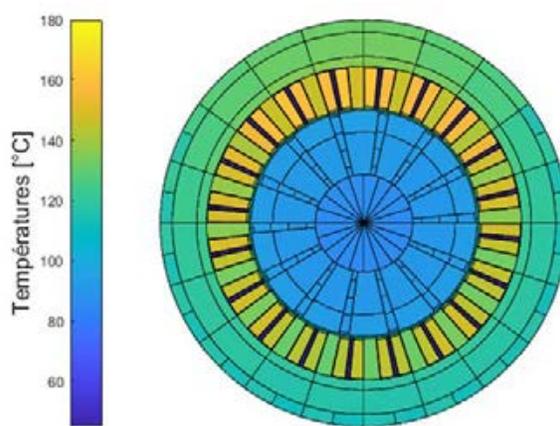
$T_{\max} = 176,39^{\circ}\text{C}$



$T_{\max} = 98,2^{\circ}\text{C}$

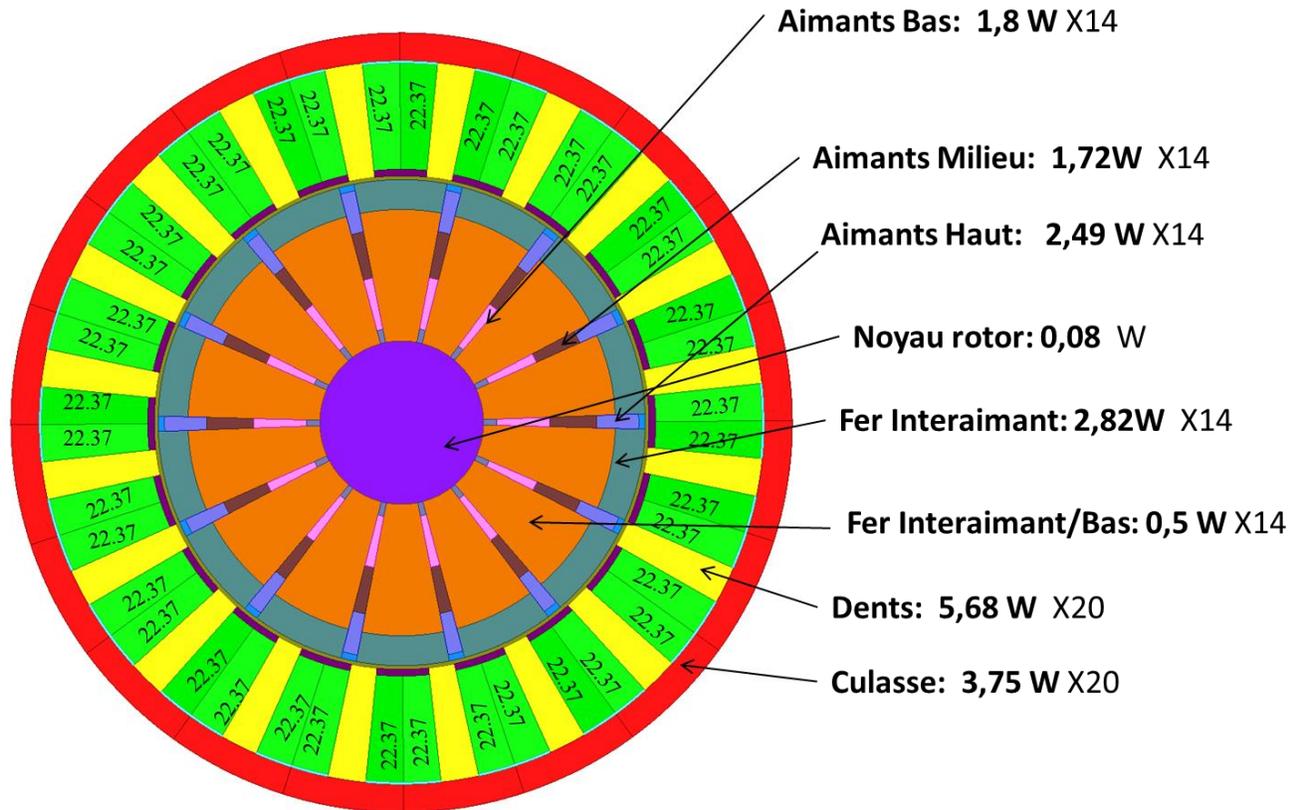


Coupe milieu rotor/stator



Phase	Cas de dimensionnement (T en °C)	Combinaison de solutions (T en °C)	ΔT
1	158,2	89,61	68,59
2	149,2	81	68,2
3	152,01	85,4	66,61
4	151,8	85,9	65,9
5	148,5	80,2	68,3

Vitesse de rotation 9000 rpm

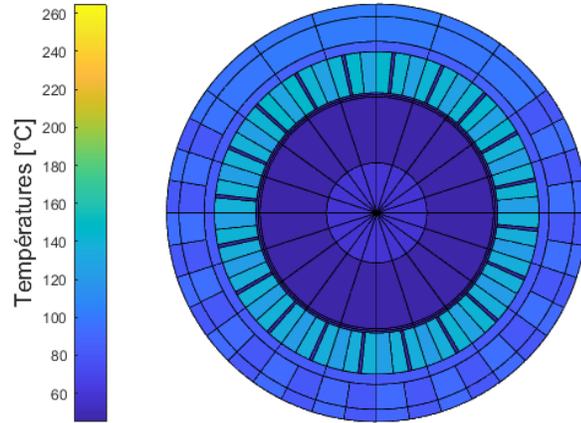
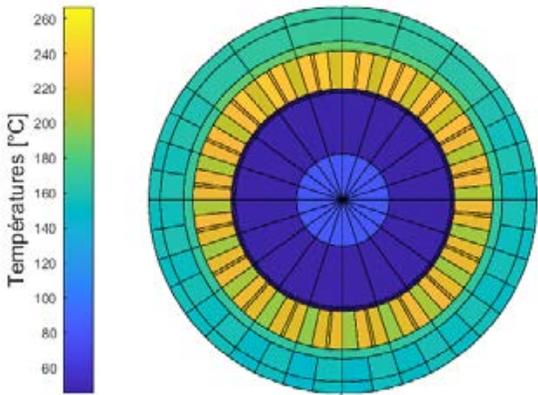
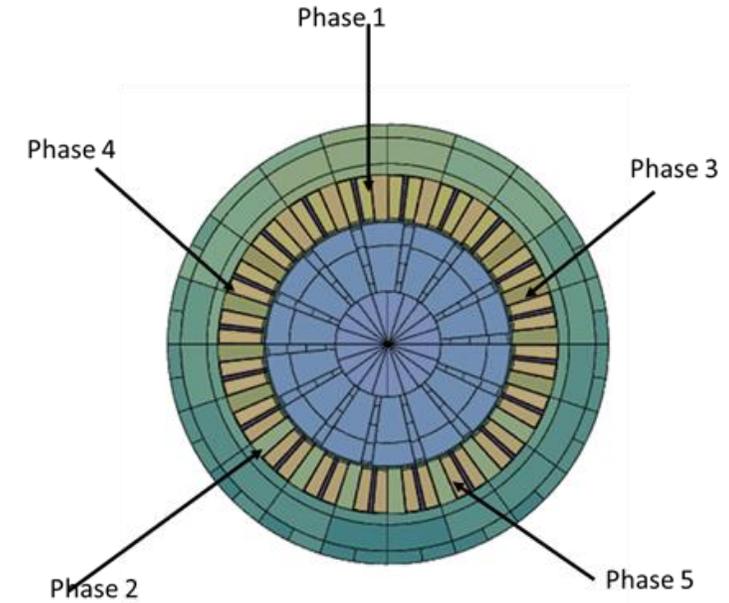


Pertes totales au rotor = 130,6 W
Pertes totales au stator = 188 W
Pertes totales Cuivres = 895 W

Têtes de bobines coupe 2

Cas extreme

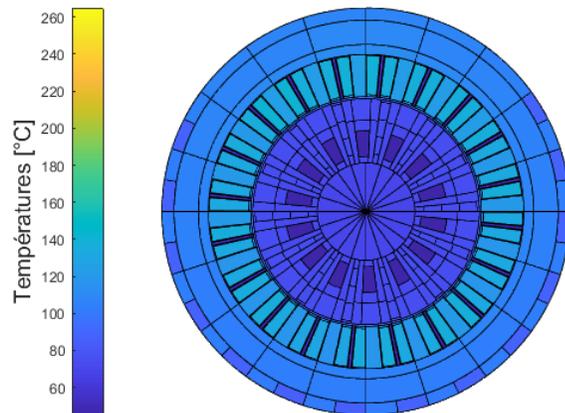
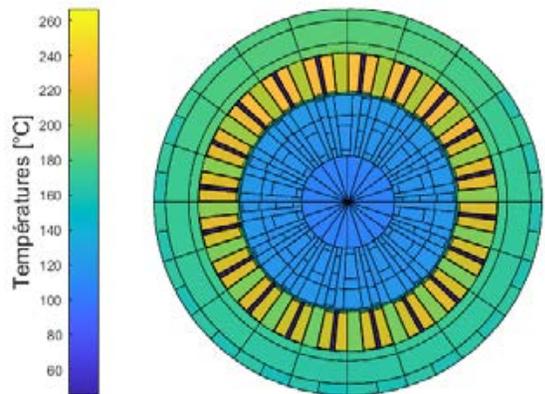
Combinaison des solutions



$T_{max} = 263,3^{\circ}\text{C}$

$T_{max} = 145,8^{\circ}\text{C}$

Coupe milieu rotor/stator



Phase	Cas 9000 rpm (T en °C)	Combinaison de solutions (T en °C)	ΔT
1	221,5	139,7	81,1
2	211	129,4	81,6
3	214,3	133,9	80,4
4	213,9	133,2	80,7
5	210,4	128,8	81,7

Plus le système de refroidissement permet de dissiper une large gamme de flux thermique, plus, ce système est impactant pour le coût financier,

Ce graphique met en avant l'importance de connaître la puissance thermique à évacuer d'un élément pour y associer le système de refroidissement adapté,

