

Les transformateurs de distribution

1. Problématique

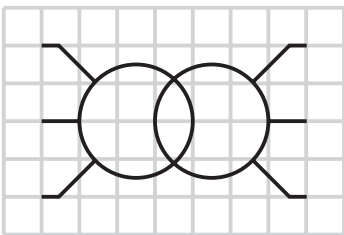
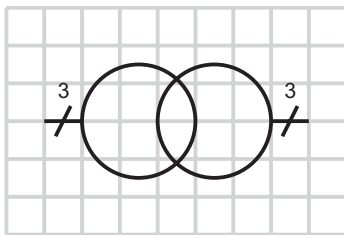
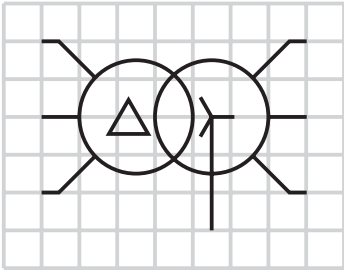
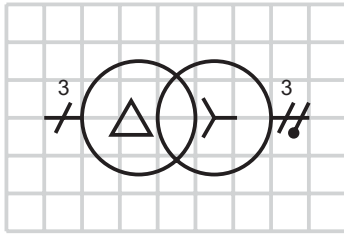
La **SPCC** est une entreprise qui consomme beaucoup d'énergie électrique pour sa production. Elle dispose d'un poste de livraison alimenté en 20 kV et d'un transformateur qui permet d'assurer l'alimentation des récepteurs en 230 / 400 V.

2. Fonction - symboles

La fonction du transformateur de distribution est la suivante :

Le transformateur de distribution permet de transformer les tensions alternatives triphasées du domaine haute tension en tensions alternatives triphasées du domaine basse tension. Les transformateurs sont réversibles c'est-à-dire qu'ils peuvent abaisser les tensions alternatives ou les élever.

Complétez le tableau suivant avec les symboles demandés.

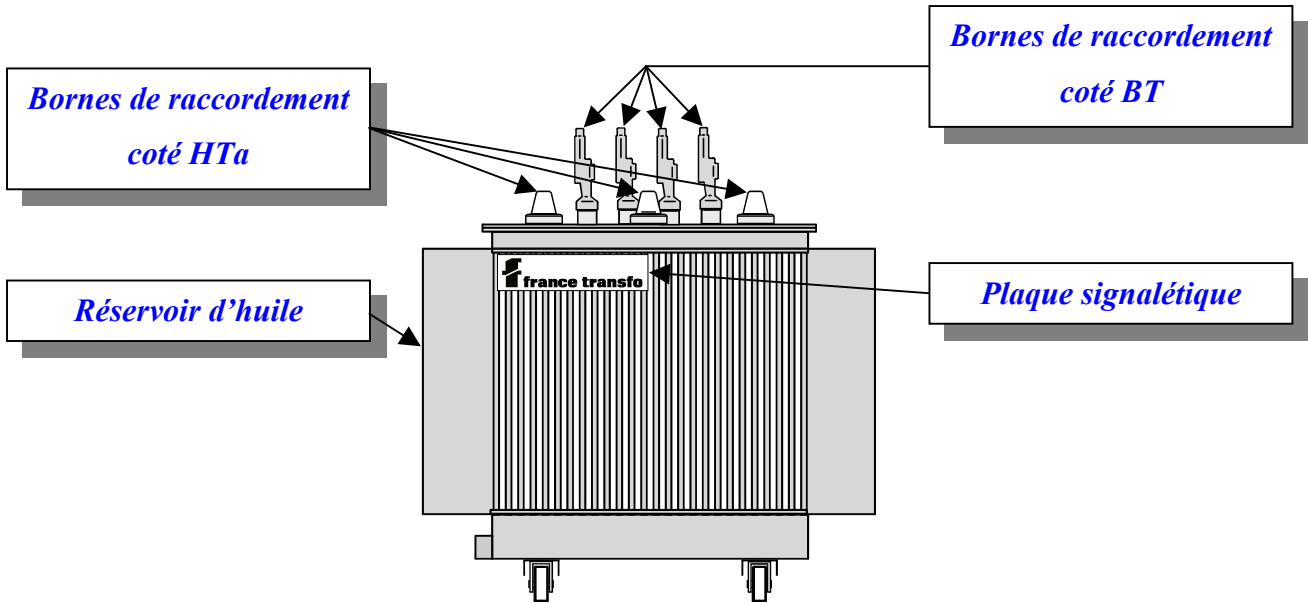
	Schéma multifilaire	Schéma unifilaire
Transformateur triphasé, symbole général		
Transformateur triphasé, couplé Dyn (couplage triangle au primaire, étoile au secondaire, neutre sorti)		

3. Constitution

Le transformateur est constitué d'enroulements primaires qui reçoivent l'énergie électrique et la convertissent en énergie magnétique, d'un circuit magnétique qui canalise cette dernière et d'enroulements secondaires qui convertissent l'énergie magnétique en énergie électrique. Il n'y a aucun contact électrique entre primaire et secondaire (séparation galvanique). La tension aux bornes des enroulements est proportionnelle au nombre de spires et au couplage des enroulements. Dans le cas du transformateur triphasé, nous avons trois enroulements primaires et trois enroulements secondaires (parfois six demi-enroulements secondaires pour des couplages zig-zag).

3.1. Transformateurs immergés

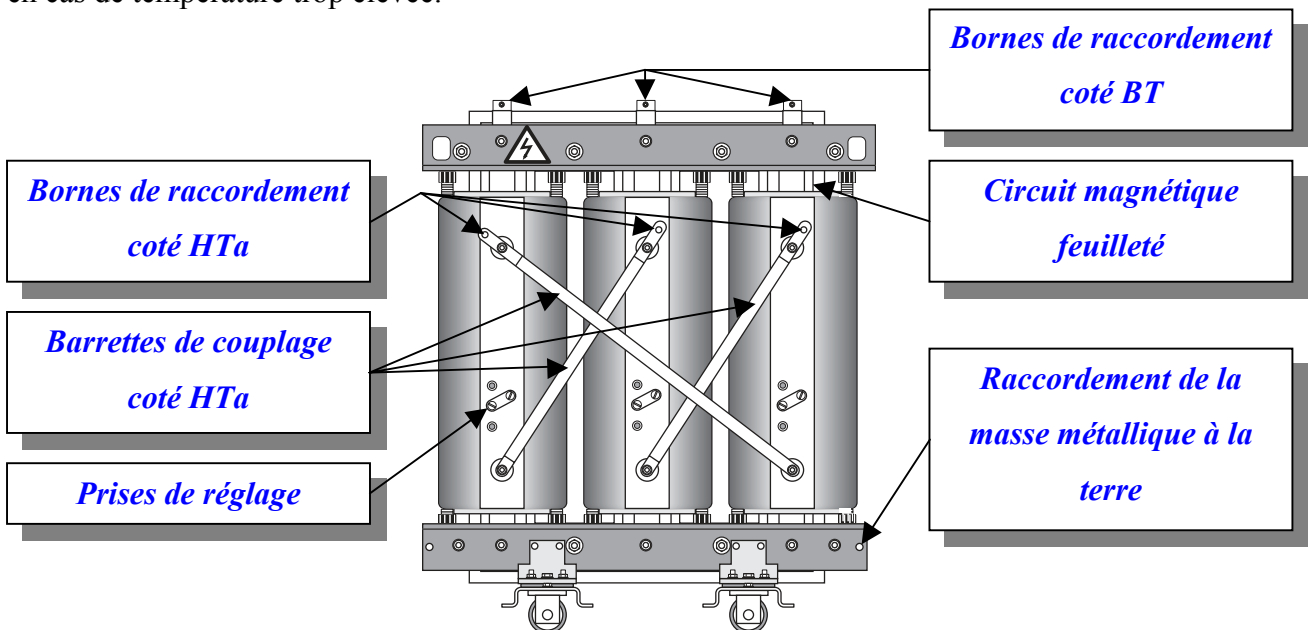
Les transformateurs immergés baignent dans un liquide, généralement de l'huile minérale (dérivé pétrolier) ou de l'huile végétale, qui assure des fonctions d'isolement électrique et d'évacuation de la chaleur produite vers l'extérieur afin de refroidir le matériel. Des sondes thermiques sont incluses au sein des bobinages afin d'assurer la protection du transformateur en cas de surcharge. Les principaux problèmes rencontrés sur les transformateurs immergés sont les fuites d'huile (pollution) et le fait que l'huile soit inflammable. Les transformateurs nus doivent être placés dans une cellule fermée afin d'interdire l'accès aux pièces nues sous tension.



Transformateur immergé (source Schneider Electric)

3.2. Transformateurs secs

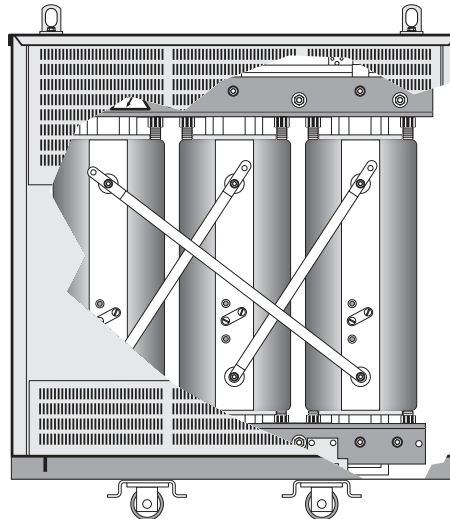
Les transformateurs secs n'ont pas de problème de fuite mais nécessitent un refroidissement efficace et une maintenance régulière. Comme leurs homologues immergés, ils doivent être montés dans des cellules interdisant l'accès aux parties sous tension. Des sondes de température permettent une surveillance thermique des enroulements entraînant la mise hors tension en cas de température trop élevée.



Transformateur sec sans enveloppe de protection IP00 (source Schneider Electric).

Les prises de réglages (le commutateur de réglage sur certains modèles) permettent l'adaptation de la tension primaire du transformateur à celle réellement présente sur le réseau afin de tenir compte des chutes de tension (exemple : 19 - 19,5 - 20 - 20,5 - 21 kV pour 20 kV nominaux). Ce réglage s'effectue obligatoirement hors tension.

Les transformateurs secs peuvent être équipés d'une enveloppe de protection qui garanti un IP3X compatible avec la réglementation en vigueur sans qu'il ne soit nécessaire de placer celui ci dans une cellule spéciale.



Transformateur sec avec enveloppe de protection IP31 (source Schneider Electric)

4. Critères de choix

Un transformateur de distribution se choisit en fonction des critères suivants :

- *Tension primaire (imposée par le fournisseur d'énergie),*
- *Tension secondaire (imposée par les récepteurs),*
- *Puissance apparente nominale (imposée par la consommation des récepteurs),*
- *Technologie (transformateur sec ou immergé, contraintes de maintenance),*
- *Type de refroidissement (naturel ou forcé).*

5. Mise en parallèle de transformateurs

Lorsque la puissance d'un transformateur de distribution est insuffisante, il est possible d'en mettre plusieurs en parallèle. A partir de votre documentation ressource (L'alimentation en énergie : les sources) donnez les conditions de mise en parallèle de transformateurs :

- *La puissance apparente du plus gros des transformateurs doit être au plus égale au double de celle du plus petit,*
- *Tensions primaires et secondaires égales,*
- *Caractéristiques de court-circuit identiques (même tension de court-circuit en %),*
- *Couplages et indices horaires compatibles (même groupe), voire identiques.*

6. Indices horaires

L'indice horaire représente le déphasage électrique entre les tensions simples primaires et secondaires. Il sert principalement lors de la mise en parallèle de transformateurs. Avoir deux indices horaires identiques sur deux transformateurs permet d'être sûr que les tensions secondaires sont en phase et que la mise en parallèle peut être faite sans danger.

L'indice horaire se détermine en fonction du sens de bobinage des enroulements primaires et secondaires et du couplage des transformateurs. On part des caractéristiques des bobines présentes sur chacun des noyaux magnétiques et on trace le diagramme vectoriel des tensions primaires et secondaires. Le couplage primaire est représenté par une lettre majuscule qui peut être :

- *Un D pour un couplage primaire en triangle,*
- *Un Y pour un couplage primaire en étoile.*

Le couplage secondaire est représenté par une lettre minuscule qui peut être :

- *Un d pour un couplage secondaire en triangle,*
- *Un y pour un couplage secondaire en étoile,*
- *Un z pour un couplage secondaire en zig-zag.*

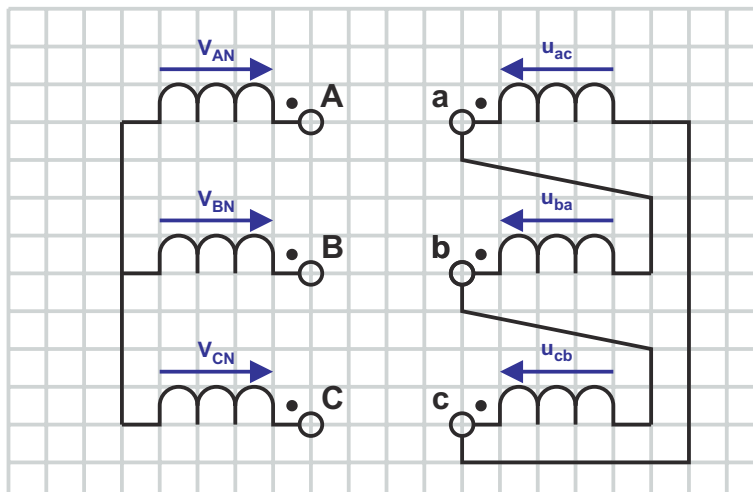
Théoriquement, rien ne s'oppose à un couplage au primaire en zig-zag, mais cette configuration n'est jamais mise en œuvre industriellement.

Si le neutre est sorti, on retrouve un « N » suivant la lettre qui indique le couplage primaire ou un « n » qui suit la lettre qui indique le couplage secondaire.

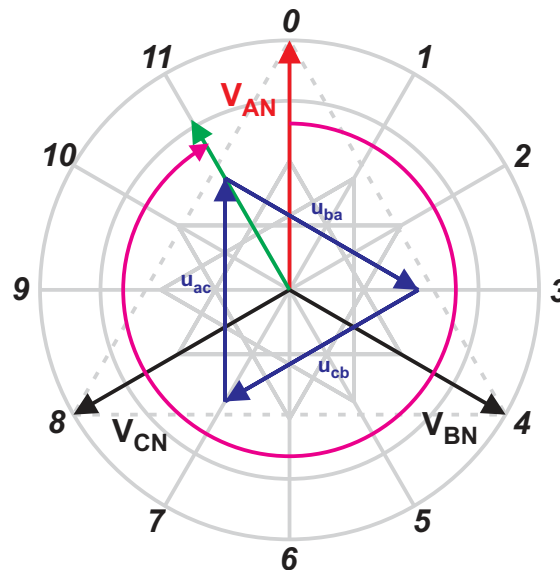
Les lettres précédentes sont suivies d'un nombre de 0 à 11 qui indique le déphasage entre tension primaire et secondaire. En multipliant ce nombre par 30, on obtient le déphasage en degrés entre les tensions simples.

La détermination de l'indice horaire se fait à partir du schéma de couplage du transformateur. On trace le diagramme vectoriel des tensions simples au primaire et au secondaire en prenant comme référence une des tensions coté **HTa**. Le déphasage de la tension coté **BT** par rapport à la tension **HTa** sur l'enroulement primaire situé sur le même noyau est l'indice horaire.

Complétez le schéma ci-dessous afin d'avoir un couplage **Yd** et repérez les tensions sur chaque enroulement.



En prenant comme référence la tension V_{AN} (tension simple entre la phase raccordée à la borne A et le point commun des trois enroulements du primaire), complétez le diagramme vectoriel des tensions simples primaires et tensions simples secondaires du transformateur précédent.



*Le transformateur est couplé en étoile au primaire (Y), en triangle au secondaire (d).
Le déphasage entre tensions simples primaires et tensions simples secondaires est de 330° (11 h), l'indice horaire complet est donc Yd11.*

7. Refroidissement

Les transformateurs ne sont pas parfaits et, malgré un rendement très élevé, ont des pertes énergétiques qui se traduisent par un échauffement (pertes Joule, pertes fer, pertes par hystérésis). Les calories produites doivent être évacuées afin de ne pas dégrader le matériel. Une codification internationale a été mise en place afin de savoir quel type de refroidissement était employé. A l'aide de votre documentation ressource, complétez le tableau suivant indiquant le mode de refroidissement adopté.

Première lettre : fluide de refroidissement interne en contact avec les enroulements		Deuxième lettre : mode de circulation du fluide de refroidissement interne	
O	<i>Huile minérale ou liquide isolant de synthèse de point de feu $\leq 300^\circ\text{C}$.</i>	N	<i>Circulation par thermosiphon à travers le système de refroidissement et les enroulements.</i>
K	<i>Liquide isolant avec point de feu $> 300^\circ\text{C}$.</i>	F	<i>Circulation à travers le système de refroidissement, circulation par thermosiphon dans les enroulements.</i>
L	<i>Liquide isolant à point de feu non mesurable.</i>	D	<i>Circulation forcée à travers le système de refroidissement et dirigée du système de refroidissement jusqu'aux enroulements principaux au moins.</i>

Troisième lettre : fluide de refroidissement externe		Quatrième lettre : mode de circulation du fluide de refroidissement externe	
A	<i>Air.</i>	N	<i>Convection naturelle.</i>
W	<i>Eau (water).</i>	F	<i>Circulation forcée (ventilateurs, pompes).</i>

Les transformateurs immergés sont équipés d'un **DGPT** (Détecteur de Gaz, de Pression et de Température) ou d'un **DGPT2** (DGPT à deux niveaux). Cet appareil permet de détecter un défaut au niveau du liquide de refroidissement (gaz dû à l'ébullition du liquide ou à une augmentation de la pression conséquence de la dilatation (température anormalement élevée)). Lorsqu'un défaut est détecté, on met hors tension les équipements raccordés au secondaire du transformateur. Si le deuxième seuil est atteint, on met hors tension le primaire du transformateur.

Les transformateurs de distribution secs sont équipés de sondes de température au sein des bobinages. Elles permettent une surveillance de la température et une mise hors tension du transformateur en cas d'échauffement anormal.

8. Maintenance

Une bonne maintenance est indispensable pour que le matériel ait une durée de vie conséquente. Les opérations de maintenance pour les transformateurs secs sont :

- *Dépoussiérage des connexions électriques afin d'éviter les amorçages (arc électrique dans l'air),*
- *Contrôle du bon fonctionnement des sondes de température situées dans les bobinages,*
- *Vérification de l'efficacité du refroidissement.*

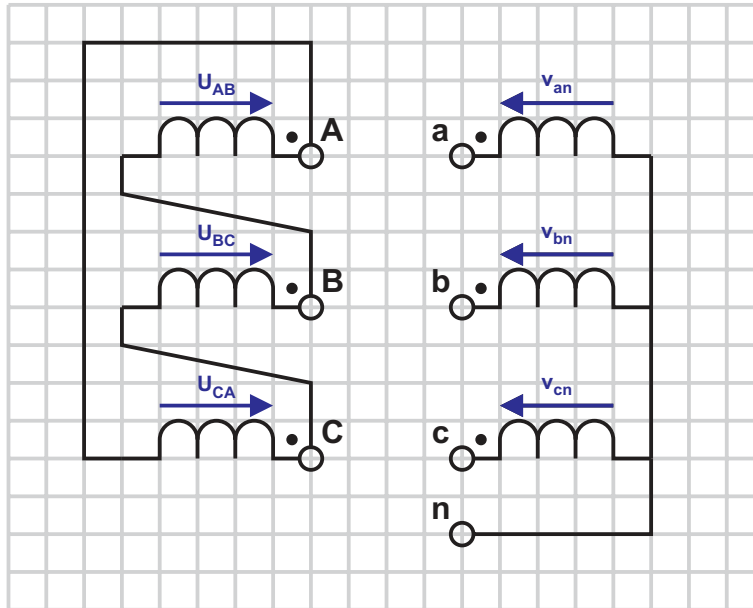
Pour les modèles immergés :

- *Vérification de la qualité du liquide diélectrique (huile),*
- *Vérification de l'absence de dépôt au fond de la cuve,*
- *Vérification de l'absence de fuite.*

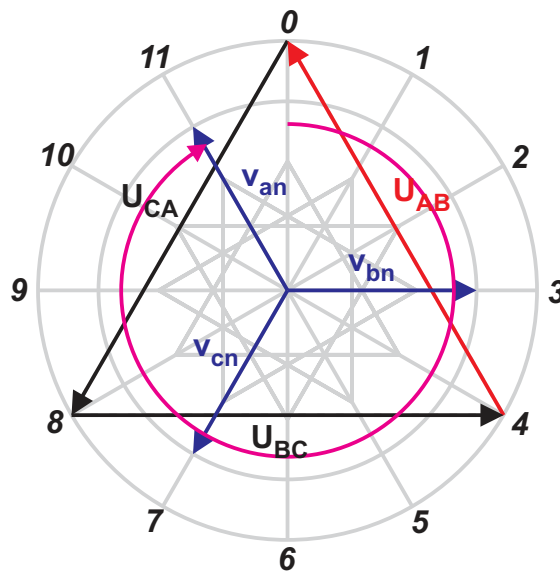
Une habilitation **HN** est un minimum pour ces interventions.

9. Application

La **SPCC** dispose d'un transformateur de distribution **Trihal** 20kV - 410 / 237 V de **400 kVA**. L'objet de cette application est d'ajouter un second transformateur en parallèle sur celui-ci pour faire face à l'arrivée de nouvelles machines dans les ateliers de production. Le besoin supplémentaire de puissance est estimé à **150 kVA**. Sur l'illustration suivante qui représente le couplage du transformateur, fléchez les tensions primaires et secondaires en respectant les conventions données au paragraphe 6 : indices horaires.



Tracez ci-dessous le diagramme vectoriel afin de déterminer l'indice horaire de ce matériel.



Quel est l'indice horaire du transformateur ?

Le transformateur est couplé en triangle au primaire (D), en étoile au secondaire (y), le neutre est sorti (n). Le déphasage entre tensions simples primaires et secondaires est de 330° (11 h), l'indice horaire est donc Dyn11.

A partir de votre documentation ressource, déterminez la (les) puissance(s) nominale(s) du transformateur qu'il est possible de mettre en parallèle sur le précédent.

Le rapport de puissance des transformateurs doit être au plus dans un rapport de deux. Le transformateur installé à une puissance de 400 kVA, le nouveau doit donc avoir une puissance comprise entre 200 et 800 kVA. Les puissances normalisées disponibles et utilisables pour notre application sont 250, 400, 630 kVA et 800 kVA.

Quelle est la puissance du modèle retenu ? Justifiez votre réponse.

Le besoin est de 150 kVA, un transformateur de 250 kVA couvre les nouveaux besoins et sera donc retenu.

Relevez sur votre documentation ressource le type de refroidissement adopté par les transformateurs secs enrobés **Trihal** de France Transfo lorsqu'ils sont utilisés à la puissance assignée (puissance nominale). Est-il possible d'aller au delà de cette puissance ?

Les transformateurs secs enrobés Trihal ont un refroidissement type AN à la puissance nominale. Il est possible d'aller à 40% de puissance supplémentaire au-delà de cette puissance nominale en adoptant une ventilation forcée type AF.

Décodez les lettres relatives au refroidissement jusqu'à la puissance nominale.

- *A : fluide de refroidissement externe : Air,*
- *N : mode de circulation du fluide de refroidissement externe : convection Naturelle.*

Décodez les lettres relatives au refroidissement au-delà de la puissance nominale.

- *A : fluide de refroidissement externe : Air,*
- *F : mode de circulation du fluide de refroidissement externe : ventilation Forcée.*

Est-il possible de mettre un transformateur **Végéta** de 250 kVA en parallèle avec le transformateur existant ?

Pour mettre deux transformateurs en parallèle, ils doivent avoir un rapport de puissance inférieur ou égal à 2 (ici $400 / 250 = 1,6$), des tensions primaires et secondaires égales (ici $20kV - 410 / 237 V$), un indice horaire compatible (ici Dyn11 pour les deux transformateurs) et une tension de court-circuit identique. Le transformateur Trihal a une tension de court-circuit de 6 % alors qu'elle n'est que de 4 % pour le transformateur Végéta. Il n'est donc pas possible de mettre un transformateur Trihal et un Végéta en parallèle.

Relevez le type de refroidissement du transformateur **Végéta**.

Les transformateurs Végéta ont un refroidissement KNAN.

Décodez la codification relative au refroidissement de ce transformateur.

- *K : fluide de refroidissement interne en contact avec les enroulements : liquide isolant avec point de feu > 300 °C,*
- *N : mode de circulation du fluide de refroidissement interne : circulation par thermosiphon à travers le système de refroidissement et les enroulements,*
- *A : fluide de refroidissement externe : Air,*
- *N : mode de circulation du fluide de refroidissement externe : convection Naturelle.*