



RAPPORT DE PROJET

EVOLUTION D'UN CONTACTEUR



Gauthier ALVES - Juan BEDOYA MARTINEZ

Polytech Clermont - ABB

Tuteur projet : Mme Fanny LANCESEUR

Tuteur Polytech : M. Michel JAMES

Remerciements

En préambule de cette étude, nous tenons tout d'abord à remercier :

Mme Fanny LANCESSEUR, M. Jorge GARCIA RODRIGUEZ et ABB pour nous avoir fourni cette étude et nous avoir accordé leur confiance.

Nous exprimons également notre gratitude à M. Michel JAMES, notre tuteur à Polytech, pour son suivi et ses retours lors des réunions d'avancement, ainsi qu'à M. Jonathan BERNARD pour ses précieuses remarques.

Enfin, nous souhaitons remercier M. Rafik SMAALI pour son aide technique lors de notre étude théorique sur l'architecture des contacteurs.

Table des matières

1	Contexte et présentation du projet	1
1.1	Présentation de l'entreprise ABB	1
1.2	Objectifs du projet et de l'étude	1
2	Gestion du projet	2
3	Étude des contacteurs dans l'état de l'art	5
3.1	Définition et principe de fonctionnement d'un contacteur	5
3.2	Les différentes technologies de contacteurs	6
4	Travail effectué	9
4.1	Mesures sur les différents contacteurs	9
4.2	Analyse des mesures	11
4.3	Synthèse de l'analyse des mesures	19
4.4	Perspectives	19
	Bibliographie	21

Table des figures

1	Logo d'ABB	1
2	Cahier des charges réalisé à partir de la documentation technique fournie par ABB .	2
3	GANTT du projet	3
4	WBS global	4
5	WBS spécifique à l'étude	5
6	Schéma du principe de fonctionnement d'un contacteur [1]	6
7	Schéma général de mesure	10
8	Comportement théorique du courant dans une bobine de contacteur	14
9	Comparaison des profils de courant avec et sans carte de commande	15
10	Comparaison des profils de courant après retrait de la carte de commande	16
11	Comparaison des architectures internes des circuits magnétiques	17
12	Comportement attendu d'un contacteur en mode économie avec vérification de l'état fermé	18
13	Comparaison des profils de courant en mode blocage	18

Liste des tableaux

1	Comparaison des commandes en courant continu et alternatif	8
2	Nombre de contacteurs reçus par marque	9
3	Inventaire des différentes références de contacteurs reçus	9
4	Répartition des contacteurs selon la puissance et la présence d'une carte de commande	12
5	Moyennes des métriques des contacteurs - Catégorie 1	12
6	Moyennes des métriques des contacteurs - Catégorie 2	12
7	Moyennes des métriques des contacteurs avec carte de commande	13
8	Résultats des tests sans carte de commande	16

Résumé

Dans un contexte industriel où la fiabilité et l'efficacité énergétique sont essentielles, ABB cherche à moderniser sa gamme de contacteurs TAL afin de répondre aux nouvelles exigences normatives et techniques. Ce projet vise à optimiser la consommation énergétique des contacteurs, assurer leur compatibilité avec les automates programmables (PLC) et améliorer leur performance globale.

L'étude s'est appuyée sur des analyses expérimentales de contacteurs ABB et concurrents (SIEMENS, Schneider, Eaton) avec et sans carte de commande. Les résultats montrent que les modèles SIEMENS équipés de cartes de commande offrent une meilleure gestion énergétique, tandis que les contacteurs ABB affichent une tension de pull-in plus faible mais une consommation plus élevée. Une analyse approfondie des circuits magnétiques et des cartes de commande a été réalisée pour identifier les leviers d'amélioration.

Les conclusions soulignent la nécessité d'intégrer des cartes de commande optimisées et d'améliorer la conception des circuits magnétiques pour répondre aux normes telles que la PLC Safety. Des travaux futurs incluront une modélisation avancée et des simulations pour guider la modernisation de la gamme TAL.

Mots clés : Contacteur, ABB, PLC, consommation énergétique, carte de commande, optimisation

Abstract

In an industrial context where reliability and energy efficiency are crucial, ABB aims to modernize its TAL contactor range to meet new regulatory and technical requirements. This project focuses on optimizing the energy consumption of contactors, ensuring compatibility with programmable logic controllers (PLCs), and improving overall performance.

The study was based on experimental analyses of ABB and competitor contactors (SIEMENS, Schneider, Eaton), both with and without control cards. The results show that SIEMENS models with control cards offer better energy management, while ABB contactors exhibit lower pull-in voltage but higher power consumption. An in-depth analysis of magnetic circuits and control cards was conducted to identify key areas for improvement.

The findings highlight the need to integrate optimized control cards and improve the design of magnetic circuits to comply with standards such as PLC Safety. Future work will include advanced modeling and simulations to guide the modernization of the TAL product line.

Keywords : Contactor, ABB, PLC, energy consumption, control card, optimization

Introduction

Dans le secteur industriel, les contacteurs jouent un rôle central dans la commutation des circuits électriques, garantissant sécurité et efficacité opérationnelle. Cependant, les exigences normatives et les défis énergétiques imposent une évolution des technologies existantes. La gamme de contacteurs TAL d'ABB, en usage depuis plusieurs décennies, nécessite une modernisation afin de répondre aux nouvelles contraintes de compatibilité avec les automates programmables (PLC) et aux normes en vigueur, notamment en matière d'efficacité énergétique et de sécurité fonctionnelle.

Ce projet vise à analyser les performances des contacteurs actuels et à identifier des axes d'amélioration pour optimiser leur consommation énergétique et leur fiabilité. Une étude comparative a été réalisée entre les contacteurs ABB et ceux de concurrents (SIEMENS, Schneider, Eaton), en mettant en avant l'impact des cartes de commande sur leurs caractéristiques électriques. Cette analyse repose sur des mesures expérimentales, des observations à l'oscilloscope et des simulations numériques permettant d'évaluer les performances des différentes architectures.

L'objectif de ce rapport est donc de présenter les résultats de cette étude et de proposer des recommandations techniques pour orienter le développement d'une nouvelle génération de contacteurs TAL, intégrant des solutions adaptées aux contraintes industrielles modernes.

Pour cela, nous commencerons par présenter le contexte et les objectifs du projet, avant d'exposer la méthodologie adoptée et l'état de l'art des différentes technologies de contacteurs. Nous détaillerons ensuite les mesures réalisées et l'analyse des résultats, mettant en lumière les différences de performances entre les modèles étudiés. Enfin, nous proposerons une synthèse des observations et les perspectives d'amélioration pour la modernisation de la gamme TAL.

1 Contexte et présentation du projet

1.1 Présentation de l'entreprise ABB

ABB (Asea Brown Boveri) [2] est une multinationale suédo-suisse, leader mondial dans les technologies de l'énergie et de l'automatisation. Fondée en 1988 et ayant son siège social à Zurich, ABB est présente dans plus de 100 pays et emploie environ 105 000 personnes à travers le monde. Son expertise couvre un large éventail de solutions industrielles, notamment dans l'électrification, l'automatisation, la robotique et la gestion des systèmes énergétiques.

En France, ABB est implantée depuis plus de 30 ans et compte environ 1 200 employés. L'un de ses principaux centres d'excellence mondiaux est situé à Chassieu, près de Lyon, où sont développés et produits divers équipements industriels, notamment des contacteurs. Ce site est l'un des plus importants pour la production de contacteurs, avec plus de 5 millions d'unités fabriquées pour des applications industrielles, ferroviaires et énergétiques.



FIGURE 1 – Logo d'ABB

1.2 Objectifs du projet et de l'étude

Le projet mené dans le cadre de cette étude porte sur la modernisation de la gamme de contacteurs *TAL* d'ABB. Conçue il y a près de 20 ans, cette gamme nécessite une mise à jour pour s'adapter aux évolutions technologiques et aux nouvelles exigences des clients. Cette modernisation vise à améliorer la compatibilité avec les *automates programmables industriels* (PLC), ce qui implique une capacité de pilotage optimisée pour des applications industrielles et ferroviaires.

Par ailleurs, la mise à niveau de la gamme doit répondre à des normes strictes en matière de sécurité et de performances, notamment les référentiels **EN 50155** et **IEC 60947**, essentiels pour les équipements utilisés dans des environnements exigeants. L'étude réalisée s'inscrit dans cette démarche en analysant les performances actuelles des contacteurs *TAL* et en identifiant les leviers d'amélioration, notamment en matière de conception des circuits magnétiques et d'intégration de cartes de commande pour optimiser leur fonctionnement.

D'un point de vue technique, les principales modifications viseront à :

- Étendre la plage de tension de fonctionnement pour répondre aux normes ferroviaires
- Réduire la consommation énergétique de la bobine tout en maintenant des performances comparables, voire supérieures, à la concurrence ;
- Assurer une compatibilité dimensionnelle avec les accessoires existants pour limiter les impacts sur les processus d'intégration des clients actuels.

Tous ces éléments se trouvent traduits et détaillés dans le cahier des charges (Figure 2) établi à partir de la documentation technique exigée par ABB pour ces nouveaux produits.

No	Type	Nature	Critère	Niveau	Flexibilité
F1	Fonction	Réduction de la consommation de la bobine	$\leq 6W$ en activation, $1.7W$ en maintien	Comparable à la concurrence	Aucun compromis
F2	Fonction	Garantir des temps d'ouverture et fermeture optimaux	≤ 50 ms fermeture, ≤ 30 ms ouverture	Concurrence atteinte ou dépassée	± 5 ms
F3	Fonction	Assurer une stabilité en environnement vibratoire	Résistance aux vibrations	Conforme EN 61373	$\pm 10\%$ de tolérance
C1	Contrainte	Respect des normes ferroviaires et industrielles	EN 50155, EN 50129, IEC 60947	Conforme	Aucun compromis
C2	Contrainte	Dimensions standard compatibles avec les accessoires existants	Compatible avec AF09Z... AF38Z	Conforme	± 2 mm
C3	Contrainte	Économie de ressources et conformité environnementale	Recyclabilité $> 95\%$, faible empreinte CO2	Conforme à IEC 62430	Aucun compromis

FIGURE 2 – Cahier des charges réalisé à partir de la documentation technique fournie par ABB

Objectifs de l'étude

L'objectif de cette étude est de comprendre les enjeux du projet d'ABB décrits précédemment, ainsi que d'effectuer une analyse comparative des technologies existantes sur le marché. Cela permettra d'évaluer la faisabilité du projet et d'identifier les points clés nécessaires pour répondre aux exigences techniques fixées.

Cette étude inclut une revue de l'état de l'art des différentes technologies de contacteurs, afin de mieux comprendre leurs principes de fonctionnement, leurs performances, ainsi que leurs limitations. Une analyse comparative des produits concurrents est également réalisée, en s'appuyant sur les tests effectués à partir des échantillons fournis par ABB. Ces tests permettent de mettre en évidence les écarts de performance, les points d'amélioration potentiels et les atouts des solutions actuelles par rapport aux besoins spécifiques du projet.

2 Gestion du projet

Ce projet étant un nouveau développement, une étude de l'état de l'art a été réalisée en amont afin de bien identifier les problématiques et enjeux spécifiques. Cette phase exploratoire a permis de définir les bases nécessaires pour mener à bien le projet et répondre aux exigences techniques fixées.

Une date charnière importante dans le projet est celle du 15 novembre, correspondant à l'intervention effectuée par ABB dans l'enceinte de Polytech Clermont. Cette intervention a permis d'établir un échange enrichissant sur les problématiques rencontrées par ABB, tout en offrant l'opportunité de recueillir un nombre significatif d'échantillons. Ces échantillons ont constitué une base essentielle pour démarrer l'étude comparative des différents produits et technologies. Ces étapes sont synthétisées dans le diagramme de Gantt présenté en figure 3.

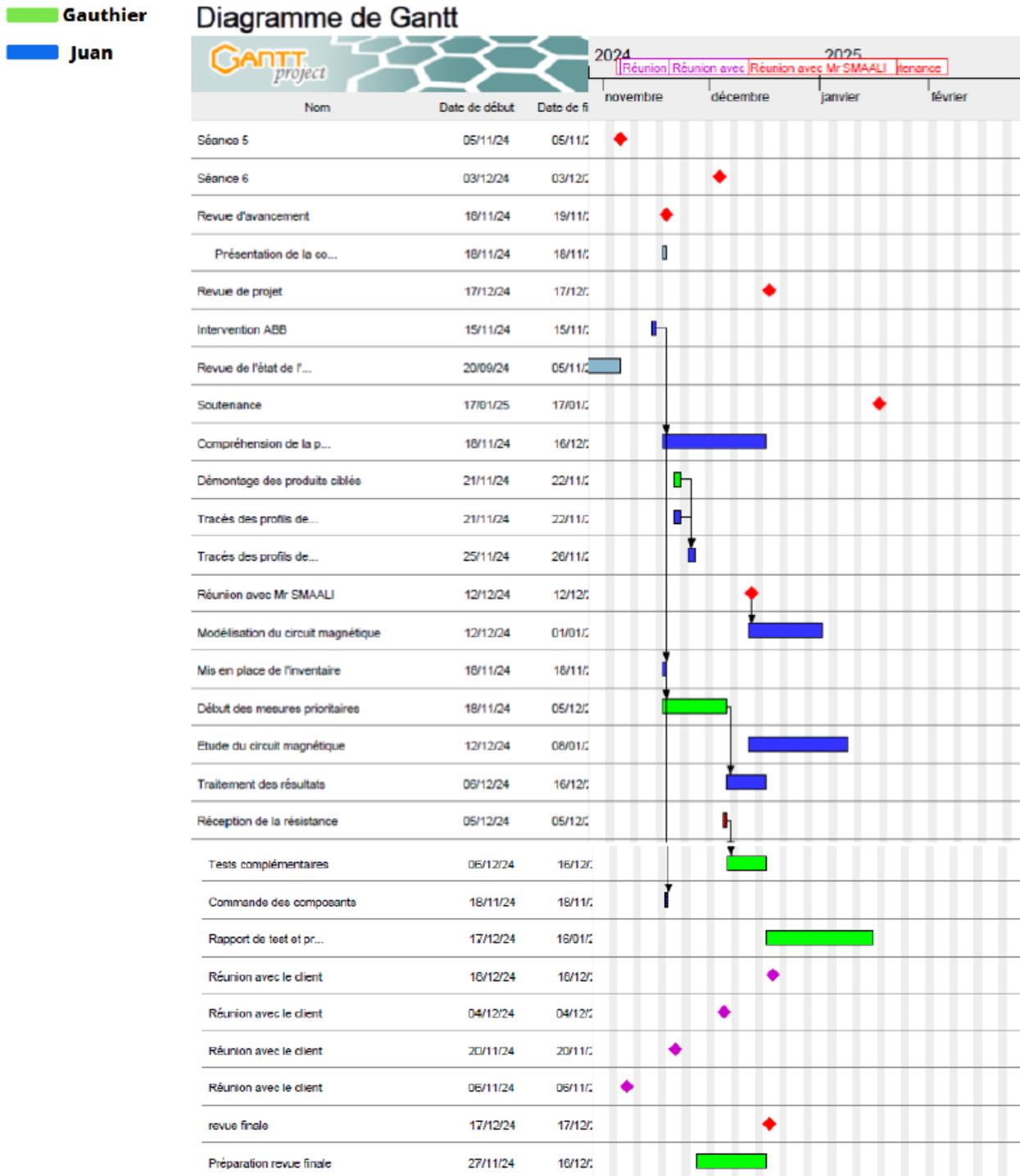


FIGURE 3 – GANTT du projet

Ce diagramme de Gantt est accompagné d'une structure de découpage du projet dit WBS (Work Breakdown Structure) visant à mieux organiser et hiérarchiser les différentes phases. Initialement, un WBS global a été réalisé pour identifier les grandes étapes du projet. Cependant, il a rapidement été constaté que le WBS global initial, bien qu'utile pour identifier les grandes étapes du projet, dépassait les moyens et le temps disponibles. Par conséquent, une partie spécifique de ce WBS, encadrée en rouge dans la version globale, a été sélectionnée pour être détaillée. Cette approche a permis de mettre en lumière les différentes tâches associées à cette partie et de structurer efficacement le travail dans le cadre de la contribution au projet. Les deux WBS se trouvent donc respectivement figure 4 et 5.

- Réalisé
- En cours
- A faire

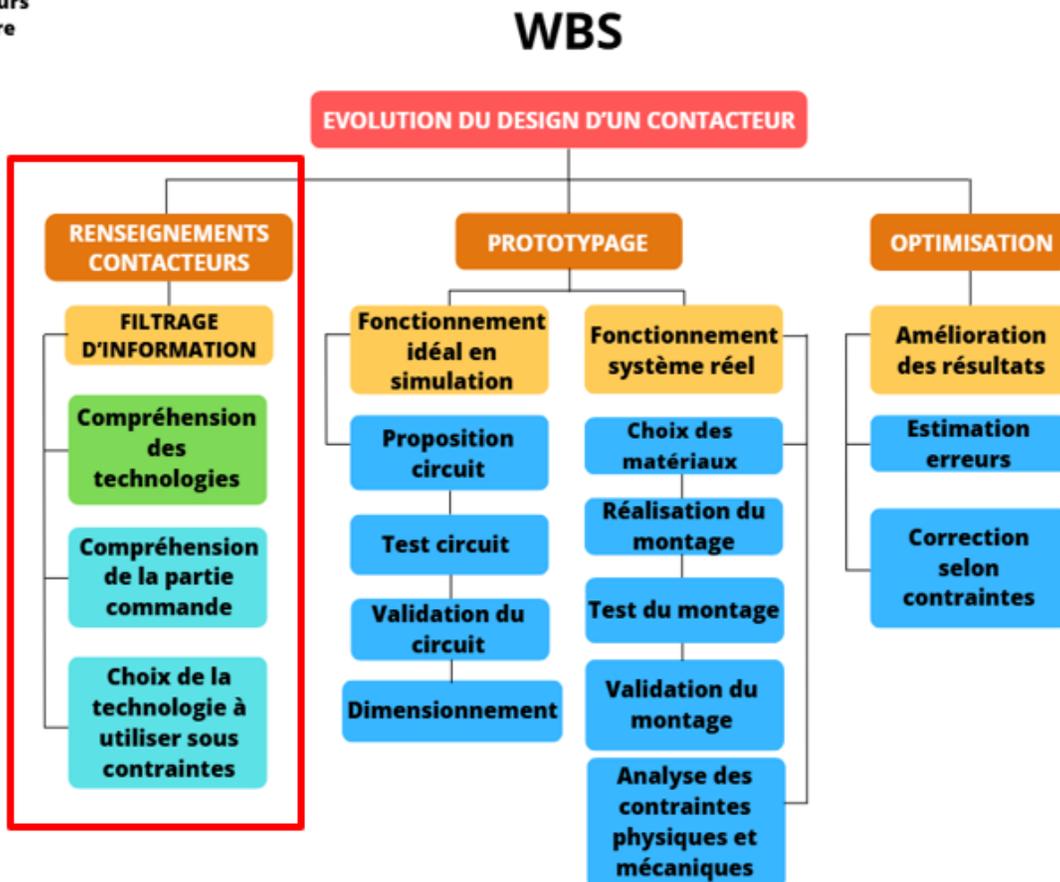


FIGURE 4 – WBS global

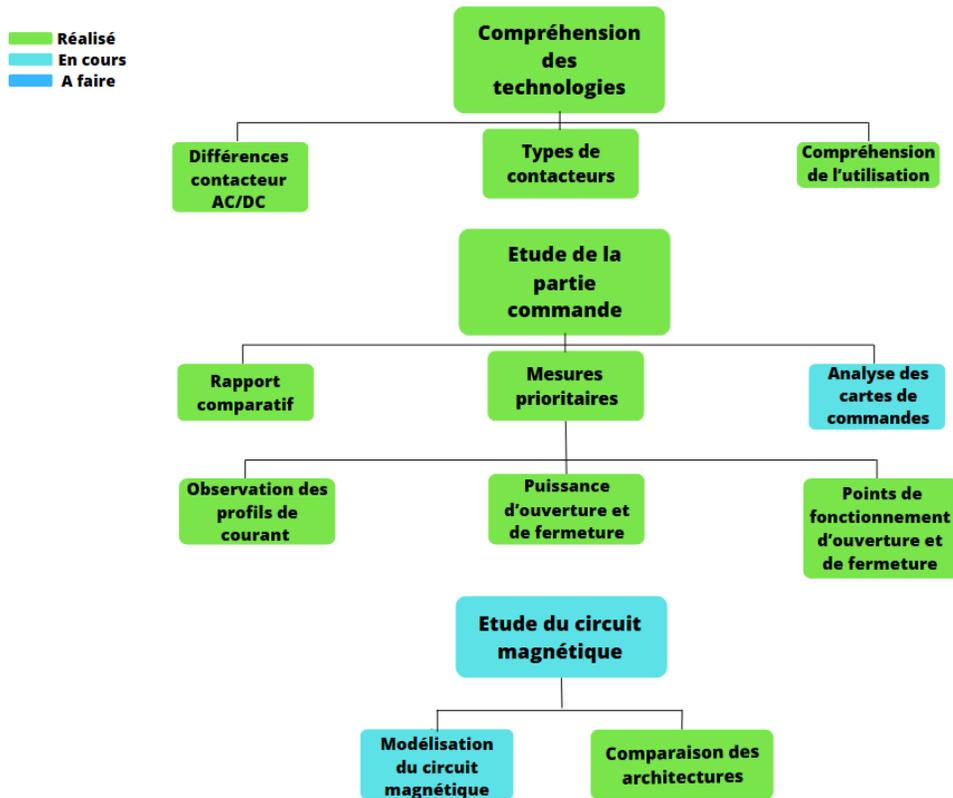


FIGURE 5 – WBS spécifique à l'étude

3 Étude des contacteurs dans l'état de l'art

3.1 Définition et principe de fonctionnement d'un contacteur

Un contacteur est défini comme un « appareil destiné à déterminer l'ouverture ou la fermeture d'un ou de plusieurs circuits et dont les éléments mobiles n'ont qu'une position de repos correspondant à l'ouverture des circuits principaux » [3]. Il est souvent associé aux circuits de forte puissance pour des fonctions de démarrage et de coupure de moteurs. Les différents qui composent un contacteur "classique sont les suivants" :

- **Bobine électromagnétique** : Génère un champ magnétique lorsqu'elle est alimentée, permettant d'actionner le contacteur.
- **Circuit magnétique** : Canalise le champ magnétique produit par la bobine pour déplacer les éléments mobiles.
- **Contacts de puissance** : Permettent le passage ou l'interruption du courant vers la charge (moteur, chauffage, etc.).
- **Contacts auxiliaires** : Fournissent des signaux pour la commande ou la signalisation (exemple : retour d'état pour un automate).
- **Armature mobile** : Déplace les contacts sous l'effet du champ magnétique.
- **Ressort de rappel** : Ramène l'armature mobile à sa position initiale lorsque la bobine n'est plus alimentée.

Principe de fonctionnement

Enfin, le principe de fonctionnement d'un contacteur est le suivant : Lorsqu'un courant traverse la bobine électromagnétique, un champ magnétique est généré, attirant l'armature mobile. Ce mouvement provoque la fermeture des contacts de puissance, permettant au courant de circuler vers la charge. Tant que la bobine est alimentée, le champ magnétique maintient les contacts fermés. Une fois l'alimentation coupée, le ressort de rappel ramène l'armature mobile à sa position initiale, ouvrant les contacts et interrompant le circuit. Ce principe est illustré de manière simple figure 6.

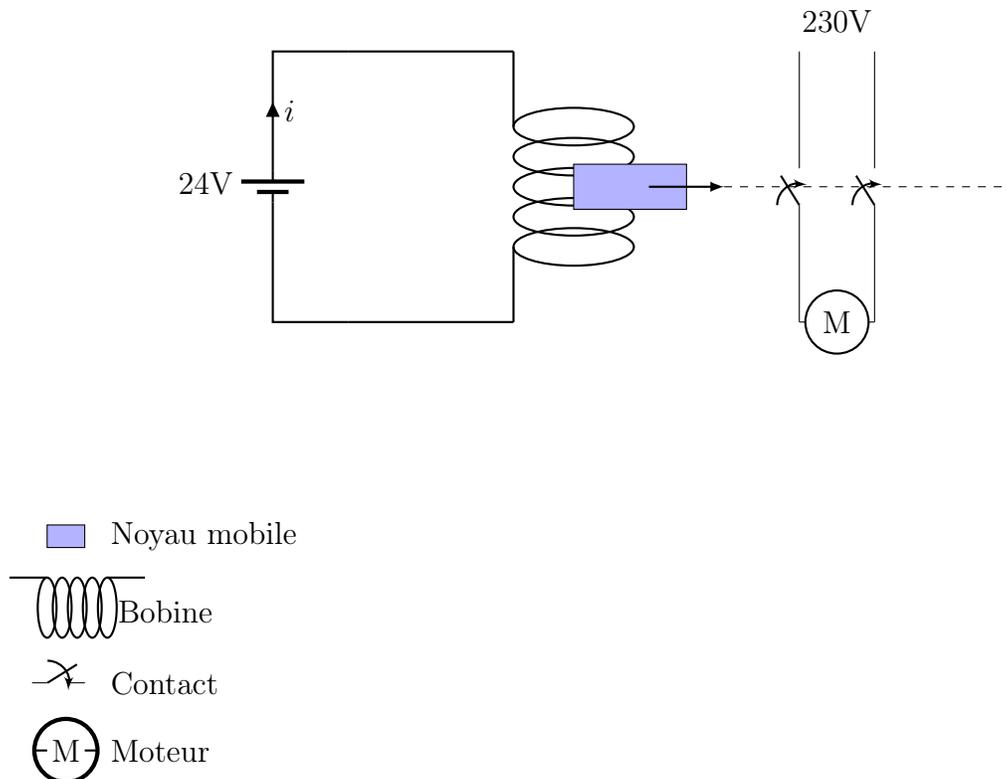


FIGURE 6 – Schéma du principe de fonctionnement d'un contacteur [1]

3.2 Les différentes technologies de contacteurs

Dans cette section, les différentes technologies de contacteurs sont étudiées. Bien que les éléments constitutifs d'un contacteur, décrits dans la section précédente, restent inchangés, le choix de la commande des bobines peut varier, et certains composants peuvent être ajoutés pour améliorer l'efficacité du contacteur en fonction de l'application visée. Ces aspects sont abordés dans cette section.

Types de commande

La bobine, l'élément que l'on commande dans un contacteur peut être activé en courant continu ou en courant alternatif. Dans les deux cas la force mise en jeu lors du mouvement de l'armature ferro-magnétique est la loi de la force magnétomotrice :

$$F = N \times I$$

avec :

- N : Nombre de spires de la bobine
- I : Courant traversé par la bobine

Dans le cas d'un courant continu, $I = U/R$ car l'impédance de la bobine concerne uniquement sa résistivité en continu. Ainsi, si on souhaite maintenir les contacts fermés, il faut maintenir le courant en continu dans la bobine.

Le cas du courant alternatif

Pour l'alternatif, le courant est déterminé par $I = \frac{U}{Z}$, avec $Z = R + jL\omega$, où L correspond à l'inductance de la bobine et ω à la pulsation ($\omega = 2\pi f$, avec f la fréquence du courant alternatif). Contrairement au courant continu, l'impédance en alternatif dépend non seulement de la résistance du bobinage (R), mais aussi de sa réactance inductive ($X_L = L\omega$).

Éléments du circuit magnétique : Pour mieux comprendre le rôle du circuit magnétique dans le comportement du contacteur en courant alternatif, les notions suivantes doivent être définies :

1. **Flux magnétique (Φ) :** Le flux magnétique représente la quantité totale de champ magnétique traversant une surface donnée. Il est exprimé en Weber (Wb) et est donné par :

$$\Phi = B \cdot A$$

où B est l'induction magnétique (en Tesla) et A est la surface traversée (en m^2). Dans un circuit magnétique, le flux est produit par le courant circulant dans la bobine et est guidé par le noyau ferromagnétique.

2. **Réductance (\mathcal{R}) :** La réductance est l'opposition qu'un matériau présente au passage du flux magnétique. Elle joue un rôle analogue à la résistance dans un circuit électrique. Elle est donnée par :

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu \cdot A}$$

où :

- l est la longueur du chemin magnétique (en m),
- μ est la perméabilité magnétique du matériau (en H/m),
- A est la section transversale du circuit magnétique (en m^2).

Une réductance faible (grâce à un matériau ferromagnétique de haute perméabilité) favorise un flux magnétique important.

3. **Inductance (L) :** L'inductance mesure la capacité de la bobine à générer un flux magnétique pour un courant donné. Elle dépend de la géométrie et des propriétés du circuit magnétique selon la relation :

$$L = \frac{N^2}{\mathcal{R}}$$

Une réductance faible (par exemple, avec un circuit magnétique fermé et un matériau ferromagnétique) augmente l'inductance.

Fonctionnement du contacteur en courant alternatif : Lorsque le contacteur est fermé, l'armature mobile complète le circuit magnétique. Cela réduit la réluctance (\mathcal{R}) en augmentant la perméabilité effective (μ) et concentre le flux magnétique dans le noyau ferromagnétique. Par conséquent :

- L'inductance (L) augmente, ce qui augmente la réactance inductive ($X_L = L\omega$).
- L'impédance totale (Z) augmente, limitant naturellement le courant absorbé par la bobine.

En revanche, lorsque le circuit magnétique reste ouvert, le flux magnétique traverse principalement l'air (faible perméabilité), ce qui augmente la réluctance et réduit l'inductance. L'impédance devient alors faible, ce qui conduit à un courant élevé et à un échauffement important de la bobine.

Ces notions permettent d'expliquer pourquoi le courant de maintien est limité naturellement en position fermée en courant alternatif, tandis qu'un échauffement excessif peut survenir en position ouverte.

Ainsi, les avantages et inconvénients des deux types de commandes se retrouvent tableau 1 ci-dessous.

TABLE 1 – Comparaison des commandes en courant continu et alternatif

	Commande en DC	Commande en AC
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Force constante et stable. - Facilité de contrôle. 	<ul style="list-style-type: none"> - Réduction naturelle du courant en position fermée. - Moins de pertes énergétiques en régime permanent.
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Consommation élevée en position fermée. - Échauffement constant. 	<ul style="list-style-type: none"> - Problème d'échauffement si le circuit reste ouvert. - Nécessite un circuit magnétique bien conçu.

Cartes de commande et aimants permanents

Bien que les deux types de commande aient leurs avantages, la commande en courant continu (DC) est généralement privilégiée pour sa stabilité et sa simplicité de contrôle. De plus, l'inconvénient principal de la commande en continu résidant dans le fait que la tension doit être maintenue constamment, des cartes de commande permettent de limiter cet inconvénient. En effet cette carte permet d'abaisser la tension lorsque le contacteur est fermé de façon à économiser de l'énergie et à limiter l'échauffement. Un diagramme présentant les différents éléments de celle-ci est disponible en annexes. Une autre solution utilisée dans les contacteurs à éclairage principalement consiste à utiliser des aimants permanents. En effet, les aimants permanents intégrés aux contacteurs permettent de maintenir les contacts ouverts ou fermés sans alimentation continue. Lorsque la bobine est alimentée, elle génère un champ magnétique qui polarise l'aimant et permet la commutation des contacts. Une fois la position atteinte, l'aimant maintient les contacts, réduisant la consommation d'énergie et les pertes thermiques. Cependant, cette technologie est limitée aux applications où les cycles de commutation sont peu fréquents et aux environnements où les champs magnétiques externes ne sont pas importants donc ils peuvent difficilement être utilisés dans le cadre des produits ABB en développement.

4 Travail effectué

4.1 Mesures sur les différents contacteurs

Inventaire des contacteurs reçus

Comme indiqué précédemment, l'intervention d'ABB effectuée le 15/11/24 a permis d'obtenir un nombre d'échantillons importants de contacteurs fabriqués par ABB et ses concurrents. Ci-dessous, les tableaux 2 et 3 récapitulent respectivement les références et le nombre total de contacteurs récupérés.

TABLE 2 – Nombre de contacteurs reçus par marque

Marque	Nombre de contacteurs
ABB	28
EATON	3
SCHNEIDER	7
SIEMENS	10

TABLE 3 – Inventaire des différentes références de contacteurs reçus

Marque	Références différentes	Références avec carte de commande
ABB	7	14
EATON	1	0
SCHNEIDER	4	0
SIEMENS	6	4

Définition des métriques à mesurer et des protocoles de mesure

Après discussion avec le client, les métriques prioritaires à mesurer ainsi que les protocoles de mesure associés ont été définis. Les métriques retenues sont les suivantes :

- Tension de pull-in : tension nécessaire pour activer le contacteur.
- Tension de drop-out : tension à laquelle le contacteur se désactive.
- Puissance de maintien : puissance nécessaire pour maintenir le contacteur en position fermée.

Les différents protocoles de mesure ainsi que les incertitudes associées sont détaillés dans la section suivante.

Protocoles de mesure

Points de fonctionnement

Pour la mesure des points de fonctionnement des contacteurs, voici le protocole détaillé que nous avons suivi. Les mesures sont réalisées à l'aide d'un voltmètre avec une résolution de 0,01 mV. Chaque mesure est donc associée à une incertitude calculée comme $\frac{r}{\sqrt{2}}$, soit 0,007 V.

Mesure de la tension de pull-in

Pour déterminer la tension de pull-in (tension à laquelle le contacteur commute), le protocole suivant est appliqué :

- Augmenter progressivement la tension jusqu'à se rapprocher de la valeur de commutation.
- Ralentir l'augmentation de la tension lorsque l'on est proche de la commutation pour garantir une précision maximale.
- Une fois que le contacteur commute complètement, couper l'alimentation et la rétablir cinq fois de suite pour s'assurer que la tension mesurée est correcte et n'est pas influencée par l'effet d'une augmentation progressive de la tension.

Mesure de la tension de drop-out

Pour déterminer la tension de drop-out (tension à laquelle le contacteur s'ouvre à nouveau), le protocole suivant est appliqué :

- Diminuer progressivement la tension appliquée au contacteur.
- Observer la tension au moment où le contacteur s'ouvre.

Mesure de la puissance de maintien

Afin de pouvoir comparer la puissance de tout les contacteurs, la puissance de maintien a été mesurée "à froid" (sans un maintien prolongée en position fermée du contacteur) avec une tension de 24V en entrée.

Toutes les mesures effectuées sont des mesures de courant et de tension respectant le schéma ci-dessous. La tension d'alimentation est fournie par un générateur de tension "AX502 Metrix", tandis que les signaux sont visualisés à l'aide d'un oscilloscope "Tektronix TDS 210". La mesure de la tension est réalisée avec un voltmètre "TENMA 72-7720", et le courant est mesuré à l'aide d'une pince ampèremétrique "Chauvin Arnoux E3N".

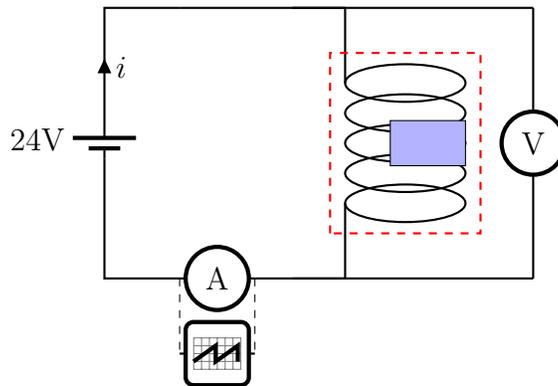


FIGURE 7 – Schéma général de mesure

Incertitude sur la mesure de puissance

L'incertitude sur les mesures des points de fonctionnement étant déjà donnée, la formule pour l'incertitude sur la puissance est énoncée ci-dessous :

$$u_c(P) = P \times \sqrt{\left(\frac{u_c(U)}{U}\right)^2 + \left(\frac{u_c(I)}{I}\right)^2}$$

Où :

- $u_c(P)$ est l'incertitude sur la puissance P ,
- $u_c(U)$ est l'incertitude sur la tension U ,
- $u_c(I)$ est l'incertitude sur le courant I ,
- U est la valeur de la tension,
- I est la valeur du courant.

Cette formule est la relation standardisée d'incertitude pour un produit de deux grandeurs mesurées, car la puissance P est ici calculée à partir des mesures indépendantes de la tension U et du courant I .

Pour la pince ampèremétrique, l'incertitude est liée à sa sensibilité S , définie par la relation suivante :

$$S = \frac{U}{I} \quad [\text{mV/A}]$$

où :

- S est la sensibilité de la pince (en mV/A),
- U est la tension mesurée en millivolts (mV),
- I est le courant mesuré en ampères (A).

Dans notre cas, la sensibilité est donnée par :

$$S = 10 \text{ mV/A}$$

Cela signifie que pour une variation de 1A, la pince génère une variation de "10 mV".

La résolution r du courant mesuré peut alors être exprimée en fonction de la résolution de l'oscilloscope ou du voltmètre utilisé pour mesurer la tension en sortie de la pince. Par exemple, avec une résolution de 1 mV, la résolution du courant devient :

$$r = \frac{1 \text{ mV}}{10 \text{ mV/A}} = 0.01 \text{ A}$$

L'incertitude sur le courant $u_c(I)$, liée à la résolution de la pince ampèremétrique, est donnée par la relation suivante :

$$u_c(I) = \frac{r}{\sqrt{2}}$$

où :

- $u_c(I)$ est l'incertitude sur le courant I ,
- r est la résolution du courant mesuré (en A).

Dans notre cas :

$$r = 0.1 \text{ A}$$

L'incertitude devient alors :

$$u_c(I) = \frac{0.1}{\sqrt{2}} \approx 0.07 \text{ A}$$

4.2 Analyse des mesures

L'analyse des mesures est divisée en plusieurs parties. Premièrement, il s'agit de définir quels contacteurs sont comparables entre eux du point de vue de ces métriques et sur quel(s) critère(s). Ensuite, il s'agira d'analyser les différents groupes définis. Par ailleurs, compte tenu de la taille importante du tableau de mesures, il n'est pas fourni en annexe.

Critères de partage des contacteurs

Les contacteurs ont été triés selon deux critères : le premier est la puissance maximale AC-3, qui est la puissance maximale qu'un contacteur peut commuter en régime alternatif pour une utilisation normale, souvent utilisée pour normaliser un contacteur dans l'industrie. Le second critère est la présence ou non d'une carte de commande, qui influence directement le comportement et les fonctionnalités du contacteur.

Les différents groupes obtenus sont résumés dans le tableau ci-dessous :

TABLE 4 – Répartition des contacteurs selon la puissance et la présence d'une carte de commande

Catégorie	Nombre de Références	Nombre de Contacteurs
P < 7,5 kW sans carte	5	16
P > 7,5 kW sans carte	4	12
P < 7,5 kW avec carte	4	10
P > 7,5 kW avec carte	2	4

Analyse des contacteurs sans carte de commande

Les résultats détaillés des mesures pour chaque catégorie de contacteurs sont présentés dans les tableaux 5 et 6. Ces tableaux regroupent les valeurs moyennes pour les principales métriques analysées : la tension de pull-in, la tension de drop-out et la puissance moyenne.

Le tableau 5 présente les moyennes calculées pour les contacteurs de la catégorie 1 :

TABLE 5 – Moyennes des métriques des contacteurs - Catégorie 1

Modèle	Fabricant	V _{in} (moy.)	V _{out} (moy.)	P (moy.)
TAL09	ABB	9.94	3.17	4.83
DILM9-09	EATON	12.99	5.44	4.32
LC1D09BD	SCHNEIDER	15.15	2.85	5.52
LC01D096BDS207	SCHNEIDER	14.65	2.88	5.64
LC01D096BLS207	SCHNEIDER	14.37	1.78	3.90
3RT2025-2KB40	SIEMENS	13.26	2.11	4.08
3RT2017-2KB41	SIEMENS	14.35	3.64	2.64

De la même manière, le tableau 6 présente les moyennes calculées pour les contacteurs de la catégorie 2 :

TABLE 6 – Moyennes des métriques des contacteurs - Catégorie 2

Modèle	Fabricant	V _{in} (moy.)	V _{out} (moy.)	P (moy.)
TAL40	ABB	11.96	2.52	4.86
TAL26	ABB	11.51	3.76	4.98
3RT2027-2KB40	SIEMENS	13.10	1.57	4.08
3RT2025-2KB40	SIEMENS	13.26	2.11	4.08

En analysant les résultats des tableaux 5 et 6, plusieurs tendances se dégagent concernant les performances des contacteurs ABB par rapport à leurs concurrents.

Dans la catégorie 1, ABB se distingue par une tension de pull-in plus faible, ce qui peut représenter un avantage dans des applications nécessitant une activation à faible tension. Toutefois, leur consommation en puissance reste plus élevée que celle des modèles EATON, mais plus faible que celle des modèles SCHNEIDER.

Dans la catégorie 2, les modèles TAL40 et TAL26 d'ABB affichent systématiquement une consommation en puissance plus élevée que les modèles SIEMENS (3RT2027-2KB40 et 3RT2025-2KB40). De plus, leurs tensions de drop-out sont également plus élevées, indiquant une capacité réduite à se désactiver à des tensions plus basses.

De manière générale :

- Les contacteurs ABB présentent une consommation en puissance systématiquement plus élevée que leurs concurrents, sauf dans la catégorie 1 face aux modèles Schneider.
- Leur avantage réside principalement dans leurs tensions de pull-in plus faibles, ce qui peut s'avérer bénéfique pour certaines applications spécifiques.
- Les modèles SIEMENS se démarquent par une meilleure efficacité énergétique et une meilleure stabilité au niveau des tensions de drop-out.

Cependant, au regard du cahier des charges, aucun des produits analysés, à l'exception de la référence **AF26Z-22-00-30**, ne respecte la norme PLC Safety, qui impose une puissance de maintien inférieure à 1,7 W. Ce critère n'est actuellement respecté par aucun des modèles sans carte de commande. Ainsi, les seules références susceptibles de répondre à cette exigence sont des modèles intégrant une carte de commande, ce qui amène à l'analyse spécifique de ces références.

Analyse des contacteurs avec une carte de commande

Cinq références fonctionnelles¹ de contacteurs avec cartes de commande sont disponibles pour cette étude, comprenant trois modèles SIEMENS et trois modèles ABB.

Cette partie concerne donc :

- L'analyse des métriques mesurées pour ces contacteurs.
- Les observations effectuées de leur comportement à l'oscilloscope.
- L'étude des différentes architectures pour la mise en œuvre d'une carte de commande dans un tel système.

Analyse des métriques mesurées

Les mêmes métriques ont été mesurées pour ces contacteurs avec cartes de commande. Les résultats sont résumés dans le tableau 7, présentant les moyennes obtenues pour la tension de pull-in, la tension de drop-out et la puissance.

TABLE 7 – Moyennes des métriques des contacteurs avec carte de commande

Modèle	Fabricant	V_{pullin} (moy.)	V_{dropout} (moy.)	P_m (moy.)
3RT2017-2KB41-0LA2	SIEMENS	16.70	12.71	1.20
3RT2025-2XB40-0LA2	SIEMENS	14.78	11.02	1.44
AF38Z-30-00-30	ABB	16.23	10.55	2.16
AF09Z-30-10-30	ABB	16.58	10.43	2.16
AF26Z-22-00-30	ABB	16.31	10.39	1.68

1. Le terme "fonctionnelles" est utilisé ici pour distinguer les contacteurs opérationnels de ceux qui ont été fournis défectueux afin de les démonter et d'étudier leur architecture interne.

En analysant les résultats du tableau 7, plusieurs observations peuvent être faites :

- Les contacteurs ABB présentent une consommation en puissance significativement plus élevée par rapport aux modèles SIEMENS.
- Contrairement aux observations faites sur les modèles sans carte de commande, la tension de pull-in des modèles ABB n'offre pas ici d'avantage particulier par rapport aux modèles SIEMENS.
- Les modèles SIEMENS 3RT2017-2KB41-0LA2 et 3RT2025-2XB40-0LA2 respectent la norme **PLC Safety**, avec une puissance de maintien inférieure à 1,7 W, tandis que seul le modèle AF26Z-22-00-30 d'ABB atteint ce seuil.

Ces observations mettent en lumière un écart de performance notable entre les deux fabricants, avec un avantage clair pour les modèles SIEMENS, qui allient une consommation plus faible et une plage de tensions plus cohérente avec les exigences du cahier des charges.

L'analyse suivante portera sur les observations réalisées à l'oscilloscope ainsi que sur l'étude des différentes architectures de cartes de commande.

Observations à l'oscilloscope

Comportement attendu

Avant d'effectuer les observations sur les contacteurs disponibles, une analyse théorique du comportement attendu a été réalisée à partir d'une figure fournie par ABB, retranscrite ci-dessous (figure 8).

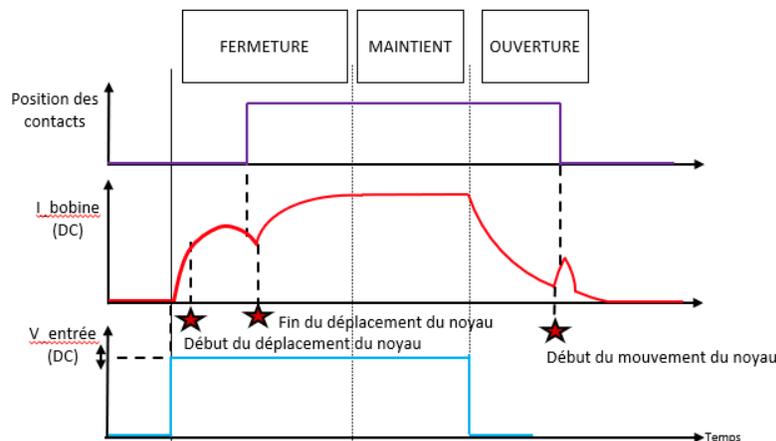


FIGURE 8 – Comportement théorique du courant dans une bobine de contacteur

Le comportement d'un contacteur, qu'il soit équipé ou non d'une carte de commande, présente des similitudes lors des phases de fermeture et d'ouverture du circuit magnétique :

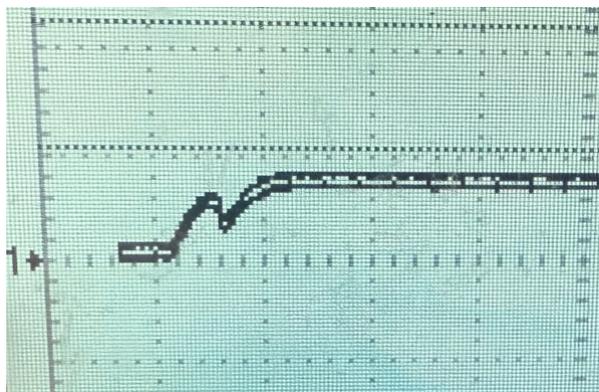
- **À la fermeture** : Une chute du courant est observée au moment où l'armature (le noyau mobile de la bobine électromagnétique) finit de se déplacer et atteint sa position finale, correspondant à la fermeture magnétique du circuit.
- **À l'ouverture** : Un pic de courant transitoire apparaît au moment où l'armature commence à se déplacer pour quitter sa position finale, lié à l'interruption du circuit magnétique.

Cependant, une différence majeure apparaît en phase de maintien. Pour un contacteur équipé d'une carte de commande, une chute significative du courant de maintien est attendue, grâce à une régulation électronique assurant une consommation réduite après l'activation du contacteur.

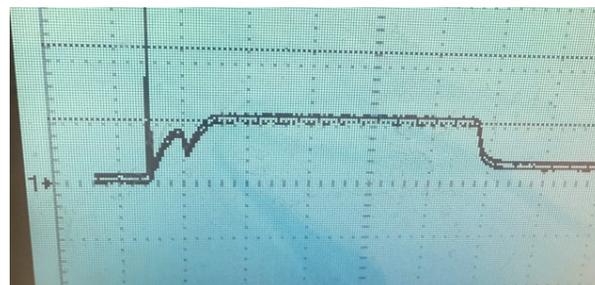
Afin de vérifier ces comportements, deux profils de courant ont été capturés à l'oscilloscope²

- Le premier correspond au modèle **SIEMENS 3RT2017-2KB41** (sans carte de commande).
- Le second correspond au modèle **SIEMENS 3RT2017-2KB41-0LA2** (avec carte de commande).

Ces profils sont présentés dans la figure 9 ci-dessous.



(a) Profil de courant - Sans carte de commande (3RT2017-2KB41)



(b) Profil de courant - Avec carte de commande (3RT2017-2KB41-0LA2)

FIGURE 9 – Comparaison des profils de courant avec et sans carte de commande

En comparant ces deux profils, on observe clairement la chute du courant en phase de maintien pour le modèle équipé d'une carte de commande (**3RT2017-2KB41-0LA2**), ce qui confirme la régulation électronique attendue. À l'inverse, le modèle sans carte de commande (**3RT2017-2KB41**) maintient un courant constant et plus élevé durant cette phase, traduisant une consommation énergétique plus importante.

Ces observations viennent ainsi valider expérimentalement le rôle clé joué par la carte de commande dans l'amélioration de l'efficacité énergétique du contacteur.

Tests sans carte

Il a été précédemment observé que les modèles SIEMENS présentaient de meilleures performances globales avec une carte de commande. Cependant, pour déterminer si ces performances sont principalement dues à la conception de la carte ou à l'architecture intrinsèque du contacteur, des mesures et des observations ont été réalisées après avoir retiré la carte de commande sur les deux modèles étudiés.

Les résultats des tests sont présentés dans le tableau 8.

Les résultats montrent que le modèle **ABB AF09Z-22-00-30** présente une consommation plus faible (14.4 W contre 18.24 W pour SIEMENS) et un courant de fermeture réduit (0.6 A contre 0.76

2. Pour une meilleure visibilité, les échelles n'ont pas été indiquées volontairement. Elles sont précisées ci-dessous :

- **Échelle horizontale** : 100 ms/carreau
- **Échelle verticale** : 50 mV/carreau

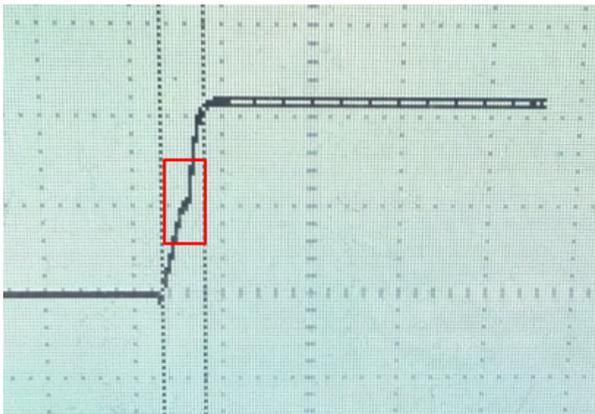
TABLE 8 – Résultats des tests sans carte de commande

Modèle	Fabricant	$I_{\text{fermeture}}$ (A)	$P_{\text{fermeture}}$ (W)	$T_{\text{fermeture}}$ (ms)
AF09Z-22-00-30	ABB	0.60	14.4	48
3RT2017-2KB41-0LA2	SIEMENS	0.76	18.24	48.00

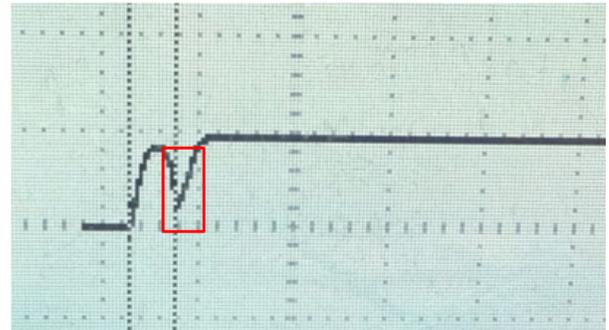
A pour SIEMENS). En revanche, les deux modèles affichent un temps de fermeture similaire (48 ms). Ces différences de performances peuvent être liées aussi bien à l'architecture magnétique des contacteurs (nombre de spires, quantité de cuivre, etc.) qu'à l'efficacité de leur circuit de commande. Une analyse plus approfondie des deux aspects serait nécessaire pour identifier précisément l'origine de ces écarts.

Observations à l'oscilloscope après retrait de la carte

Afin d'approfondir cette analyse, des observations à l'oscilloscope ont été effectuées sur les deux modèles après retrait de la carte de commande. Les résultats sont présentés dans la figure 10 ci-dessous, où les profils de courant sont comparés pour les modèles **3RT2017-2KB41-0LA2** (SIEMENS) et **AF09Z-22-00-30** (ABB).



(a) Profil de courant - SIEMENS 3RT2017-2KB41-0LA2 (sans carte)



(b) Profil de courant - ABB AF09Z-22-00-30 (sans carte)

FIGURE 10 – Comparaison des profils de courant après retrait de la carte de commande

Sur les deux graphiques, une baisse de courant caractéristique est observée lorsque l'armature commence à se déplacer. Cependant, une différence notable apparaît dans les zones encadrées en rouge :

- Sur le modèle **ABB AF09Z-22-00-30**, la chute de courant est régulière et stable, traduisant un comportement prévisible du circuit magnétique.
- Sur le modèle **SIEMENS 3RT2017-2KB41-0LA2**, la chute de courant présente une légère instabilité, presque imperceptible, un comportement inattendu. De plus, l'amplitude du courant pour ce modèle est presque deux fois supérieure à celle du modèle **ABB AF09Z-22-00-30** d'ABB.

Ces différences peuvent être mieux comprises en analysant l'architecture interne du circuit magnétique de chaque contacteur. Les figures 11 ci-dessous montrent les structures internes respectives des deux modèles :



(a) Architecture du circuit magnétique - ABB AF09Z-22-00-30



(b) Architecture du circuit magnétique - SIEMENS "0LA2"

FIGURE 11 – Comparaison des architectures internes des circuits magnétiques

L'analyse de ces deux architectures révèle des différences fondamentales :

- Le modèle **ABB AF09Z-22-00-30** présente une structure cylindrique classique, permettant un mouvement plus ample du noyau mobile. Cette architecture favorise une fermeture plus douce du circuit magnétique, ce qui explique la chute de courant plus régulière observée sur le graphique précédent.
- À l'inverse, le modèle **SIEMENS 3RT2017-2KB41-0LA2** utilise également un noyau mobile, mais celui-ci est surmonté d'une structure rectangulaire. Ce design limite considérablement le jeu mécanique et restreint le mouvement du noyau, entraînant une fermeture plus brusque du circuit magnétique. Par conséquent, une force magnétomotrice plus élevée est nécessaire par rapport à celle requise par le modèle **ABB AF09Z-22-00-30** d'ABB.

Ces différences architecturales expliquent donc les variations observées sur les profils de courant :

- Une fermeture plus progressive et contrôlée pour le modèle ABB, résultant en une chute de courant régulière.
- Une fermeture plus brusque et directe pour le modèle SIEMENS, créant une légère instabilité dans le profil de courant.

Ainsi, l'architecture interne du circuit magnétique joue un rôle déterminant dans le comportement électrique et mécanique du contacteur, influençant directement les profils de courant observés lors des phases de fermeture et d'ouverture. La mesure des métriques telles que le nombre de spires et la quantité de cuivre utilisée pour les différentes bobines est essentielle pour mieux comprendre leur impact sur les caractéristiques observées.

Observations du contacteur en blocage

Tout comme pour le profil de courant présenté dans la figure 8, le comportement attendu avec une carte de commande a été fourni par ABB et est illustré ci-dessous dans la figure 12.

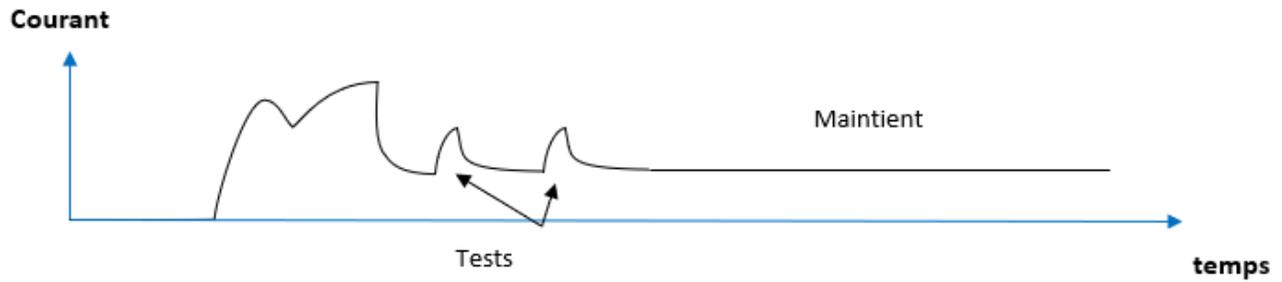
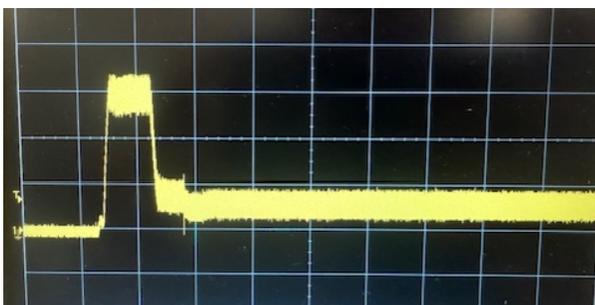


FIGURE 12 – Comportement attendu d'un contacteur en mode économie avec vérification de l'état fermé

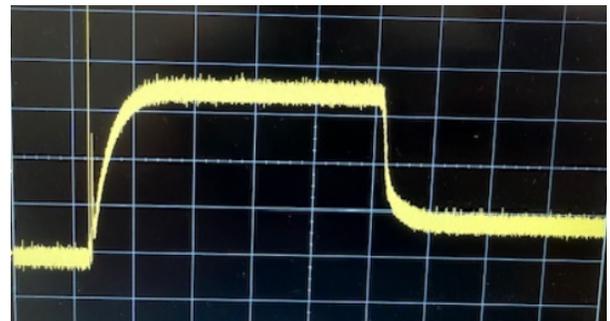
Sur cette figure, on observe qu'après une réduction de la tension d'alimentation, le système effectue deux vérifications consécutives pour s'assurer que le contacteur est bien fermé avant de passer en mode économie.

L'objectif de cette partie est d'observer ce comportement sur les modèles ABB et de comprendre ce qui se passe sur le modèle SIEMENS. Pour cela, un oscilloscope haute résolution capable de capturer davantage de points de mesure a été utilisé.

Les résultats obtenus sont présentés dans la figure 13 avec les courbes de courant pour les deux modèles étudiés³ :



(a) Profil de courant - ABB AF09Z-22-00-30 en blocage



(b) Profil de courant - SIEMENS 3RT2017-2KB41-0LA2 en blocage

FIGURE 13 – Comparaison des profils de courant en mode blocage

L'analyse des deux courbes révèle plusieurs points importants :

- Pour le modèle **ABB AF09Z-22-00-30**, on constate que le noyau ne bouge pas, car aucune chute de courant significative n'est observée. Cependant, il est difficile d'identifier clairement les deux vérifications de l'état fermé attendues, probablement en raison du bruit présent sur le signal.
- Pour le modèle **SIEMENS 3RT2017-2KB41-0LA2**, le noyau reste également stable, sans chute de courant notable. Toutefois, aucune vérification explicite de l'état fermé n'est visible, et aucune perturbation similaire à celle observée sur le modèle ABB n'est détectée.

3. Échelles : horizontale : 10 ms/carreau, verticale : 20 mV/carreau.

Ces observations suggèrent que les deux systèmes parviennent à maintenir le noyau en position de blocage sans mouvement parasite. Toutefois, l'absence d'une vérification clairement identifiable sur les deux modèles soulève des questions :

- Pour le modèle ABB, le bruit du signal pourrait masquer ces vérifications.
- Pour le modèle SIEMENS, l'origine de ce comportement reste incertaine.

Il est probable qu'un oscilloscope encore plus précis, avec une meilleure résolution temporelle et une capacité accrue de filtrage du bruit, soit nécessaire pour confirmer ces hypothèses et identifier clairement les vérifications de l'état fermé.

En conclusion, bien que le comportement global en mode blocage semble cohérent avec les attentes, des investigations supplémentaires avec un équipement plus performant seraient nécessaires pour une analyse plus précise.

4.3 Synthèse de l'analyse des mesures

L'analyse des mesures réalisées sur les contacteurs, qu'ils soient avec ou sans carte de commande, met en évidence des tendances claires quant à leurs performances respectives.

Tout d'abord, les contacteurs ABB montrent une consommation en puissance systématiquement plus élevée que leurs concurrents, notamment face aux modèles SIEMENS. Cependant, ils présentent une tension de pull-in plus faible, ce qui peut être avantageux pour certaines applications spécifiques. Malgré cela, aucun modèle ABB ne respecte la norme PLC Safety, qui impose une puissance de maintien inférieure à 1,7 W.

En comparaison, les modèles SIEMENS se démarquent par une meilleure gestion de l'efficacité énergétique, notamment grâce à une régulation électronique optimisée via leur carte de commande. Les mesures montrent également une plage de tension de fonctionnement plus stable pour ces modèles.

Les tests réalisés sans carte de commande révèlent que les performances des modèles SIEMENS dépendent fortement de leur architecture interne. L'observation des profils de courant à l'oscilloscope a permis de constater :

- Une chute de courant plus régulière pour les modèles ABB, attribuée à une architecture cylindrique du noyau magnétique permettant un mouvement plus fluide.
- Une chute plus abrupte pour les modèles SIEMENS, liée à une architecture plus rigide avec un noyau rectangulaire limitant le mouvement.

Enfin, lors des tests en mode blocage, bien que les deux systèmes parviennent à maintenir le noyau en position stable, aucune vérification claire de l'état fermé, attendue avec les cartes de commande, n'a pu être observée. Cette limitation semble liée à la résolution insuffisante des instruments de mesure utilisés.

Ces résultats soulignent le besoin évident de modernisation de la gamme TAL d'ABB. Une amélioration des performances passe inévitablement par l'intégration systématique de cartes de commande optimisées, capables de répondre aux exigences de la norme PLC Safety, et par une attention particulière portée à l'architecture interne du circuit magnétique.

4.4 Perspectives

Pour la modernisation de la gamme TAL, il est impératif d'intégrer une carte de commande optimisée. Cette solution apparaît comme une nécessité pour répondre aux exigences de la norme PLC Safety et améliorer l'efficacité énergétique globale des contacteurs.

La première étape consiste donc à réaliser une analyse approfondie de la carte de commande. À ce jour, une identification préliminaire des composants a été effectuée, représentée sous forme d'un diagramme disponible en annexe. Cependant, une étude détaillée du fonctionnement individuel de chaque composant, ainsi que des interactions entre eux, est indispensable pour comprendre et optimiser les performances globales du système.

En parallèle, une attention particulière doit être portée à l'étude approfondie des circuits magnétiques. L'étude théorique réalisée jusqu'ici a permis de poser des bases solides, mais des analyses plus poussées sont nécessaires pour caractériser précisément les comportements observés. Une modélisation numérique plus détaillée du circuit magnétique pourrait offrir une meilleure compréhension des phénomènes complexes en jeu.

Une première simulation a été réalisée à l'aide d'un code Octave, fournissant une courbe intéressante (disponible en annexe). Toutefois, cette simulation ne parvient pas encore à modéliser correctement la chute de courant observée expérimentalement. Une amélioration de cette modélisation permettra de mieux représenter les dynamiques réelles du circuit magnétique et d'en déduire des paramètres clés tels que le nombre de spires, la géométrie optimale du noyau magnétique, et les comportements transitoires critiques.

Enfin, une fois ces analyses terminées, il sera possible de faire les choix techniques déterminants pour la modernisation de la gamme TAL, en intégrant une carte de commande performante et une architecture magnétique optimisée. Ces choix devront s'aligner avec les exigences normatives, les objectifs de performance énergétique, et les contraintes économiques du produit final.

Conclusion

L'étude menée sur les contacteurs TAL a permis de mettre en évidence les principales limites des modèles actuels et d'identifier les leviers d'amélioration prioritaires. Les mesures réalisées ont montré une consommation énergétique plus élevée pour les modèles ABB par rapport à leurs concurrents, ainsi qu'une incapacité à respecter les exigences de la norme PLC Safety en l'absence d'une carte de commande optimisée.

Les analyses à l'oscilloscope ont révélé des différences marquées entre les architectures magnétiques des modèles étudiés. Les contacteurs ABB, avec une structure cylindrique du noyau, offrent une fermeture plus douce du circuit magnétique, tandis que les modèles SIEMENS, avec un noyau rectangulaire, présentent une fermeture plus rigide mais énergétiquement plus efficace.

Par ailleurs, les tests en mode blocage ont souligné l'importance cruciale de la carte de commande dans le comportement global du contacteur, tant sur le plan énergétique que fonctionnel.

Pour assurer une modernisation efficace de la gamme TAL, il est impératif de :

- Réaliser une analyse approfondie des cartes de commande existantes.
- Améliorer la modélisation numérique des circuits magnétiques pour mieux prédire les comportements dynamiques.
- Intégrer des cartes de commande optimisées capables de réguler efficacement la consommation énergétique et de respecter les exigences normatives.

Ces étapes constitueront les bases solides nécessaires pour assurer une modernisation réussie et pérenne de la gamme TAL, répondant ainsi aux attentes du marché et aux défis techniques actuels.

Bibliographie

- [1] Sciensass. Figures avec tikz en latex. <https://www.sciensass.net/TikZ.php>, 2023. Consulté en octobre 2024.
- [2] ABB. Company profile. <https://global.abb/>, 2023. Consulté en octobre 2024.
- [3] Larousse. Définition de contacteur, n.d. URL <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/contacteur/18536>. Consulté le 10 octobre 2024.

Annexes

A	Diagramme représentant les différents éléments d'une carte de commande	I
---	--	---

A Diagramme représentant les différents éléments d'une carte de commande

