



Rapport pour electrotchnique

Techniques de contrôle électrique : Systèmes traditionnels à relais et systèmes PLC et VFD



FP Larache

Master GESE

electrotchnique - PR. MRABTI TARIK

Semester 2024 2025

Souhail Chahmout, Omar mansouri

04.06.2025 - v0.1.0 - final

Contents

1 Vue d'ensemble des systèmes de contrôle électrique	5
1.0.1 Système de contrôle en boucle ouverte	5
1.0.2 Système de contrôle en boucle fermée	5
1.0.3 Systèmes de contrôle électrique dans l'industrie	6
2 Évolution des systèmes de contrôle : Des relais aux automates	7
2.0.1 L'évolution de la technologie des API	8
3 Objectives of the Report	9
4 Systèmes classiques basés sur des relais	11
4.1 Les bases des relais de contrôle	13
4.1.1 Symboles schématiques pour les relais	13
4.1.2 Circuits de relais et Ladder Diagrams	17
4.2 Contacteurs et relais - Différences et applications	19
4.2.1 Principes de fonctionnement des relais et des contacteurs	19
4.2.2 Applications clés	21
4.2.3 Explorer les types de relais électriques	22
4.2.4 Interposition des relais dans les automates	29
4.3 conclusion	32
5 Les Automates Programmables Industriels (API)	33
5.1 Introduction	33
5.2 Pourquoi l'automatisation ?	33
5.3 Structure générale des API	33
5.4 Structure interne d'un automate programmable industriel (API)	34
5.5 Fonctionnement des API	35
5.6 Différence entre un automate compact et un automate modulaire	36
5.6.1 PLC compact	36
5.6.2 PLC modulaire	37
5.7 Le langage ladder	38
5.8 Réseaux d'automates	39
5.8.1 Principe:	39
5.8.2 Bus de terrain	39
5.8.3 Différents types de réseaux d'automates :	40
5.8.4 Sécurité	41
6 implémentation	42
6.1 Projet 1 : Modélisation et simulation d'un système de pompage d'eau à l'aide d'un moteur asynchrone en commande en boucle ouverte	42
6.2 projet 2 : d'un Entraînement Électrique par Variateur de Fréquence (VFD).	56
7 Conclusion	64

Figures

Figure 1	11
Figure 2	12

Figure 3	12
Figure 4	12
Figure 5	13
Figure 6	14
Figure 7	14
Figure 8	15
Figure 9	15
Figure 10	16
Figure 11	16
Figure 12	17
Figure 13	17
Figure 14 Exemple de diagramme logique Ladder	18
Figure 15 Exemple de diagramme logique Ladder	19
Figure 16	19
Figure 17	20
Figure 18	22
Figure 19 les différents types de relais	22
Figure 20 Relais électromagnétique	23
Figure 21 Relais statique (SSR)	23
Figure 22 Relais thermique	24
Figure 23 Relais différentiel	24
Figure 24 Reed Relay	25
Figure 25 Relais à verrouillage	25
Figure 26 Relais de séquence de phase	26
Figure 27 Relais temporisé	26
Figure 28 Relais à distance	27
Figure 29 Relais de fréquence	27
Figure 30 Relais de tension	28
Figure 31 Relais de courant	28
Figure 32 Relais de courant	29
Figure 33 Relais de courant	30
Figure 34 Relais de courant	31
Figure 35 Modicon M580	34
Figure 36 Modicon M580	35
Figure 37 Fonctionnement cyclique d'un API	36
Figure 38 Temps de scrutation vs Temps de réponse	36
Figure 39 Schneider Modicon M221	37
Figure 40 PLC Module ModelAS16AP11R-A	38
Figure 41 programmation-ladder	38
Figure 42 Interconnexion par entrées/sorties déportées	39
Figure 43 Topologie étoil	40
Figure 44 Topologie Anneau	40
Figure 45 Réseau hiérarchisé	41
Figure 46	42
Figure 47	43
Figure 48	44
Figure 49	45

Figure 50 circuit équivalent par phase	45
Figure 51	47
Figure 52	49
Figure 53	50
Figure 54	51
Figure 55	51
Figure 56	52
Figure 57	52
Figure 58	52
Figure 59	53
Figure 60	53
Figure 61	54
Figure 62	54
Figure 63	54
Figure 64	55
Figure 65	57
Figure 66	57
Figure 67	58
Figure 68	59
Figure 69	60
Figure 70	61
Figure 71	61
Figure 72	62
Figure 73	62

1 | Vue d'ensemble des systèmes de contrôle électrique

Un système de contrôle électrique est une interconnexion physique de dispositifs qui influencent le comportement d'autres dispositifs ou systèmes. Un système électronique simple se compose d'une entrée, d'un processus et d'une sortie. Les variables d'entrée et de sortie du système sont des signaux. Les pompes de circulation, les compresseurs, les systèmes de fabrication, les installations frigorifiques et les panneaux de contrôle des moteurs sont des exemples de systèmes de ce type.

Les dispositifs d'entrée tels que les capteurs recueillent des informations et y répondent, et contrôlent un processus physique en utilisant de l'énergie électrique sous la forme d'une action de sortie. Les systèmes électroniques peuvent être classés comme étant de nature « causale ». Le signal d'entrée est la « cause » du changement dans le processus ou le fonctionnement du système, tandis que le signal de sortie est l'« effet », la conséquence de la cause. Par exemple, un microphone (dispositif d'entrée) convertit les ondes sonores en signaux électriques qui sont amplifiés par un haut-parleur (dispositif de sortie) produisant des ondes sonores.

Les systèmes électroniques sont généralement représentés comme une série de blocs et de signaux interconnectés. Chaque bloc est représenté avec son propre ensemble d'entrées et de sorties. C'est ce qu'on appelle la représentation par bloc-diagramme.

Les systèmes électriques fonctionnent soit avec des signaux à temps continu (CT), soit avec des signaux à temps discret (DT).

Dans un système à temps continu, les signaux d'entrée sont continus dans le temps. Il s'agit généralement de systèmes analogiques produisant un fonctionnement linéaire avec des signaux d'entrée et de sortie référencés sur une période de temps donnée, par exemple entre 13h00 et 14h00.

Un système DT est un système dans lequel les signaux d'entrée sont continus dans le temps.

1.0.1 Système de contrôle en boucle ouverte

Un système de contrôle en boucle ouverte est un système dans lequel la sortie ne renvoie pas à l'entrée pour corriger les variations. Au lieu de cela, la sortie varie en faisant varier l'entrée. Cela signifie que les conditions externes n'ont pas d'impact sur la sortie du système. Un exemple est celui d'une chaudière de chauffage central commandée par minuterie, qui s'allume entre certaines heures prédéfinies, quel que soit le niveau de confort thermique du bâtiment.

Les systèmes en boucle ouverte présentent l'avantage d'être simples, faciles à construire et généralement stables. Cependant, ils peuvent être imprécis et peu fiables car la sortie n'est pas corrigée automatiquement.

1.0.2 Système de contrôle en boucle fermée

Un système de contrôle en boucle fermée est un système dans lequel la sortie a un effet sur l'entrée afin de maintenir une valeur de sortie souhaitée. Il y parvient en fournissant une boucle de rétroaction. Par exemple, une chaudière peut être équipée d'un thermostat qui surveille le niveau de confort thermique d'un bâtiment et envoie un signal de retour pour s'assurer que le régulateur maintient la température réglée.

Les systèmes en boucle fermée ont l'avantage d'être précis et peuvent être rendus plus ou moins sensibles en fonction de la stabilité requise du système. Cependant, ils sont plus complexes en termes de conception d'un système stable.

1.0.3 Systèmes de contrôle électrique dans l'industrie

Les systèmes de contrôle électrique sont en effet essentiels dans les opérations industrielles modernes, offrant un large éventail d'avantages qui améliorent l'efficacité, la sécurité et la durabilité. Voici un aperçu plus détaillé de la manière dont ces systèmes contribuent à divers aspects du travail industriel :

- **Automatisation et production : Améliorer l'efficacité** Les systèmes de contrôle électrique rationalisent les tâches répétitives, réduisant ainsi le besoin d'intervention manuelle. Cela permet non seulement d'accélérer la production, mais aussi de minimiser les erreurs humaines et de garantir une qualité constante. Ces systèmes peuvent contrôler avec précision les machines, garantissant que les opérations sont effectuées à des vitesses optimales et avec une grande précision. Cet aspect est crucial dans les secteurs où la précision est essentielle, comme la fabrication automobile ou l'assemblage électronique. En automatisant les tâches routinières, les employés peuvent se concentrer sur des activités plus complexes et stratégiques, ce qui améliore la productivité globale et l'innovation au sein de l'organisation.
- **Systèmes de surveillance et de sécurité : Protéger vos opérations** Les capacités de surveillance avancées permettent aux systèmes de contrôle électrique de prévoir les défaillances potentielles des équipements avant qu'elles ne se produisent. Cette approche proactive permet d'éviter les temps d'arrêt imprévus et les réparations coûteuses. Des contrôles de sécurité continus et des alertes en temps réel permettent de détecter rapidement toute anomalie, ce qui réduit le risque d'accident et assure la sécurité des travailleurs. Cette approche est particulièrement importante dans les environnements à haut risque tels que les usines chimiques ou les opérations de machinerie lourde.
- **Gestion de l'énergie : Optimiser l'alimentation électrique** Les systèmes de contrôle électrique jouent un rôle important dans la gestion de la consommation d'énergie. En optimisant la distribution de l'énergie et en contrôlant les entrées et les sorties, ces systèmes aident les entreprises à réduire le gaspillage d'énergie et les coûts d'électricité. Cela permet non seulement d'améliorer l'efficacité opérationnelle, mais aussi de soutenir les objectifs de développement durable en minimisant l'impact sur l'environnement. Par exemple, dans les grandes installations de fabrication, les systèmes de gestion de l'énergie peuvent équilibrer les charges électriques afin d'éviter les pics de consommation et de réduire l'empreinte carbone globale.
- **Évolutivité et personnalisation** L'un des principaux avantages des systèmes de contrôle électrique est leur capacité à s'adapter à des besoins opérationnels spécifiques. Qu'il s'agisse d'une ligne de production à petite échelle ou d'un réseau de distribution d'énergie complexe, ces systèmes peuvent être personnalisés pour répondre aux exigences uniques d'une entreprise. Cette flexibilité garantit qu'au fur et à mesure que les opérations se développent ou changent, les systèmes de contrôle peuvent s'adapter en conséquence, offrant ainsi une valeur et une fiabilité à long terme.
- **Intégration avec les technologies modernes** Les systèmes de contrôle électrique s'intègrent souvent de manière transparente à d'autres technologies de pointe, telles que l'Internet des objets (IoT) et l'intelligence artificielle (IA). Cette intégration permet une prise de décision plus intelligente, des analyses prédictives et des capacités de surveillance à distance. Par exemple, les

capteurs compatibles avec l'IoT peuvent fournir des données en temps réel sur les performances des équipements, tandis que les algorithmes d'IA peuvent analyser ces données pour optimiser les processus et prévoir les besoins de maintenance.

2 | Évolution des systèmes de contrôle : Des relais aux automates

L'évolution de l'automatisation industrielle, des systèmes à relais aux automates programmables modernes (API), est un voyage fascinant qui met en évidence les progrès de la technologie et les exigences croissantes des industries. Voici un aperçu détaillé des phases clés de cette transformation :

- **Les débuts : Les systèmes à relais**

Avant l'avènement des automates programmables, les industries s'appuyaient fortement sur les systèmes à relais pour l'automatisation et le contrôle. Les relais, qui sont des interrupteurs électromécaniques, étaient utilisés pour ouvrir et fermer des circuits en réponse à des signaux électriques. Ces systèmes ont été largement utilisés dans les usines, les centrales électriques et d'autres environnements industriels au début du 20e siècle. Cependant, les systèmes à relais présentaient des limites importantes :

- **La complexité** : Les systèmes à relais nécessitaient un câblage important et des circuits complexes. À mesure que le nombre de relais augmentait, les systèmes devenaient de plus en plus difficiles à gérer et à entretenir.
- **Manque de flexibilité** : La modification d'un système à relais pour s'adapter à des changements dans les processus de production était une tâche fastidieuse. Elle nécessitait souvent un recâblage et des modifications physiques, ce qui était à la fois long et coûteux.
- **Problèmes de maintenance** : Les relais étant des dispositifs mécaniques, ils étaient sujets à l'usure. Une maintenance fréquente était nécessaire pour maintenir les systèmes opérationnels, ce qui entraînait des temps d'arrêt et une augmentation des coûts.

Malgré ces inconvénients, les systèmes à relais ont constitué l'épine dorsale de l'automatisation industrielle jusqu'à la fin des années 1960. Avec l'expansion des industries et l'augmentation des exigences de production, le besoin de systèmes de contrôle plus efficaces, plus fiables et plus flexibles est devenu évident.

- **La naissance des automates programmables**

Le développement des automates programmables industriels (API) a été motivé par la nécessité de disposer d'une solution d'automatisation plus adaptable et plus efficace. À la fin des années 1960, l'industrie automobile, en particulier, a dû relever des défis pour s'adapter aux changements rapides des processus de fabrication. Les systèmes de relais traditionnels ne suffisaient plus.

En 1968, Dick Morley, souvent considéré comme le « père de l'API », a présenté le premier API, le Modicon 084. Cette innovation a marqué un tournant dans l'automatisation industrielle. Les API ont été conçus pour remplacer les systèmes de relais encombrants et peu flexibles par une solution

plus rationnelle et programmable. Les premiers automates programmables offraient plusieurs avantages :

- **Programmabilité** : Contrairement aux systèmes à relais, qui nécessitaient un recâblage physique, les automates programmables pouvaient être programmés à l'aide d'un logiciel. Cela permettait de modifier et de mettre à jour facilement la logique de contrôle sans devoir procéder à un recâblage important.
- **Conception compacte** : Les automates programmables sont nettement plus petits que les panneaux à relais, ce qui permet de gagner de la place et de simplifier l'installation.
- **Fiabilité** : Avec moins de pièces mobiles que les relais, les automates programmables sont plus fiables et nécessitent moins d'entretien.
- **Polyvalence** : Les automates programmables peuvent être utilisés dans un large éventail d'applications, depuis des tâches simples comme la commande de l'éclairage jusqu'à des processus complexes comme l'automatisation des chaînes de montage.

2.0.1 L'évolution de la technologie des API

L'introduction des premiers automates programmables n'était qu'un début. Au cours des décennies suivantes, la technologie des automates a connu plusieurs évolutions majeures qui ont élargi leurs capacités et leurs applications :

- **Introduction des microprocesseurs (années 1970-1980)**: L'intégration de microprocesseurs dans les automates dans les années 1970 et 1980 a considérablement amélioré leur puissance de traitement et leur vitesse. Cela a permis aux automates de gérer des tâches plus complexes et de contrôler des systèmes plus importants avec une précision et une fiabilité accrues.
- **Programmation par logique Ladder** : La programmation par logique Ladder est devenue la méthode standard de programmation des automates. Conçue pour ressembler aux schémas des circuits logiques à relais, elle a permis aux ingénieurs et techniciens familiarisés avec les systèmes à relais de passer plus facilement à l'utilisation d'automates. La logique Ladder reste largement utilisée aujourd'hui, bien que les automates modernes prennent également en charge d'autres langages de programmation.
- **Communication Capabilities (1980s-1990s)**: As industries became more interconnected, the need for communication between different systems grew. In the 1980s and 1990s, PLCs began to be equipped with communication modules, enabling them to connect to other PLCs, computers, and devices. This led to the development of distributed control systems (DCS) and supervisory control and data acquisition (SCADA) systems, which allowed for centralized monitoring and control of multiple processes.
- **Networking and Integration (1990s-2000s)**: During the 1990s and 2000s, PLCs became more networked and integrated with other systems. The introduction of industrial Ethernet and other networking protocols enabled PLCs to communicate over long distances and integrate with enterprise-level systems like Manufacturing Execution Systems (MES) and Enterprise Resource Planning (ERP) systems. This integration facilitated real-time data collection, analysis, and decision-making, significantly improving operational efficiency.

3 | Objectives of the Report

Les objectifs du rapport portant sur l'exploration et la mise en œuvre de trois méthodes de contrôle d'une pompe à eau - contrôle classique par relais, contrôle par API et contrôle par VFD - sont les suivants :

- **Explorer et mettre en œuvre trois méthodes de contrôle**
 - **Commande à relais classique :**

Concevoir, mettre en œuvre et analyser un système de commande à relais traditionnel pour une pompe à eau, en mettant en évidence ses principes de fonctionnement, son câblage et ses caractéristiques opérationnelles.

- **Commande par automate programmable :**

Développer et mettre en œuvre un système de contrôle basé sur un contrôleur logique programmable (PLC) pour la pompe à eau, en mettant en évidence sa programmabilité, sa flexibilité et sa facilité de modification.

Contrôle basé sur un VFD : Concevoir et mettre en œuvre un système de contrôle de la pompe à eau basé sur un entraînement à fréquence variable (EFV), en démontrant sa capacité à contrôler la vitesse du moteur et à optimiser la consommation d'énergie.

- **Comparer les performances, les coûts et l'efficacité**
 - **Comparaison des performances :**

Évaluer les performances de chaque méthode de contrôle en terme

- d'exactitude et de précision dans le contrôle de la pompe à eau :
- Exactitude et précision dans le contrôle de la pompe à eau.
- Temps de réponse aux changements dans les exigences opérationnelles.

Fiabilité et robustesse dans différentes conditions de fonctionnement.

- **Analyse des coûts :**

Comparer les coûts d'installation initiaux, les dépenses de maintenance et les coûts opérationnels à long terme de chaque méthode de contrôle.

- **Évaluation de l'efficacité :**

Analyser l'efficacité énergétique de chaque méthode, en se concentrant particulièrement sur la consommation d'énergie, les économies d'énergie et l'impact sur l'environnement.

- **Mise en évidence des avantages et des limites**

Identifier les forces et les faiblesses de chaque méthode de contrôle dans le contexte des applications de pompes à eau.

Examiner les scénarios dans lesquels chaque méthode est la plus appropriée en fonction des exigences opérationnelles spécifiques.

- **Fournir des informations pratiques**

Offrir un aperçu pratique du processus de mise en œuvre de chaque méthode de contrôle, y compris les schémas de câblage, la logique de programmation (pour l'automate programmable) et les paramètres de configuration (pour l'entraînement à fréquence variable).

Partager les défis du monde réel et les solutions rencontrées lors de la mise en œuvre de chaque système.

- **Recommander la méthode de contrôle optimale**

Sur la base de la comparaison des performances, du coût et de l'efficacité, recommander la méthode de contrôle la plus appropriée pour des applications spécifiques, telles que les systèmes de pompage d'eau résidentiels, commerciaux ou industriels.

Fournir des lignes directrices pour la sélection de la méthode de contrôle appropriée en fonction de facteurs tels que la complexité du système, l'évolutivité et les contraintes budgétaires.

- **Éduquer et informer**

Sensibiliser les lecteurs aux principes fondamentaux des systèmes de contrôle à base de relais, d'automates programmables et d'EFV.

Fournir une ressource complète aux ingénieurs, techniciens et professionnels de l'industrie pour comprendre les aspects pratiques de la mise en œuvre et de la comparaison de ces méthodes de contrôle.

4 | Systèmes classiques basés sur des relais

Le mot « discret » signifie individuel ou distinct. En ingénierie, une variable ou une mesure « discrète » se réfère à un état vrai ou faux. Ainsi, un système de contrôle discret est conçu pour fonctionner sur des signaux booléens (« on » ou « off ») fournis par des capteurs discrets tels que des interrupteurs de processus. Une forme de commande discrète enseignée dans tous les cours d'introduction à l'électronique numérique implique l'utilisation de circuits appelés portes logiques. Ces circuits introduisent un ou plusieurs signaux booléens et émettent un signal booléen selon une règle simple telle que « ET » ou « OU »:

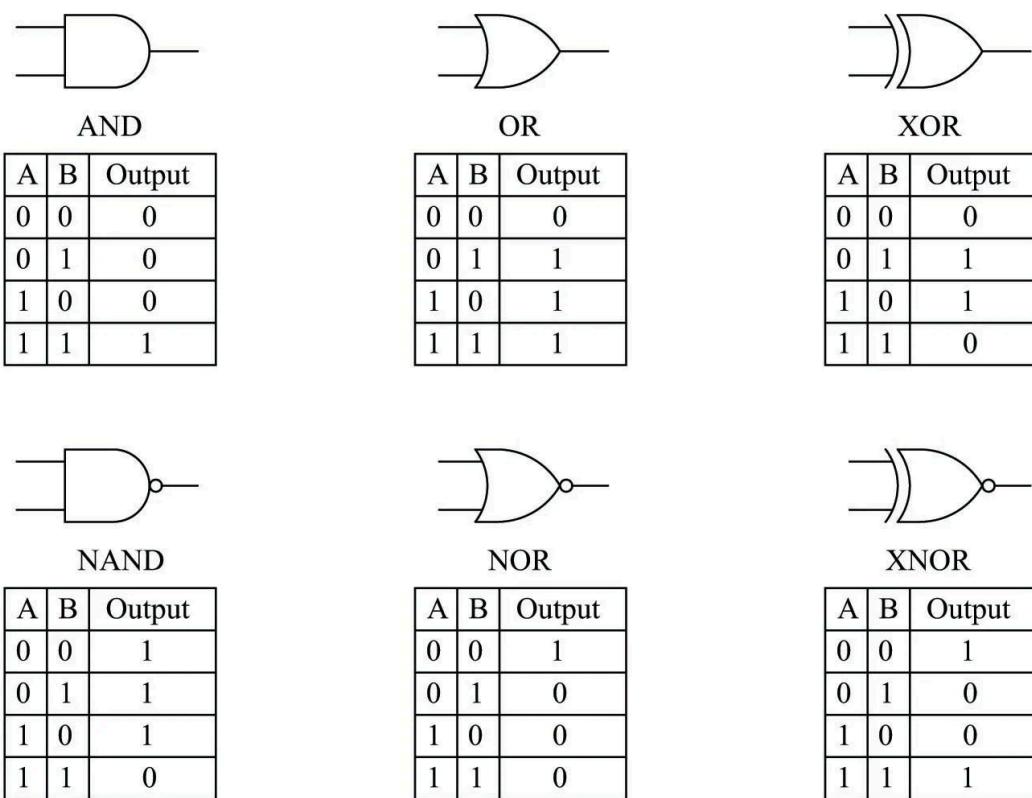


Figure 1 -

Les systèmes de contrôle industriels utilisent rarement des portes logiques de manière directe pour les systèmes de contrôle discrets, bien que les concepts fondamentaux de « ET », « OU » et d'autres types de portes soient universellement appliqués. Les fonctions de commande sont plutôt mises en œuvre à l'aide de relais électromécaniques et/ou de dispositifs numériques programmables tels que les automates programmables industriels (API). Ce chapitre se concentre sur l'utilisation pratique de ces deux technologies pour la commande discrète industrielle.

Une fonction « ET » est équivalente à des contacts normalement ouverts connectés en série dans un circuit de commande à relais, car la lampe ne sera alimentée que si l'interrupteur A et l'interrupteur B sont actionnés :

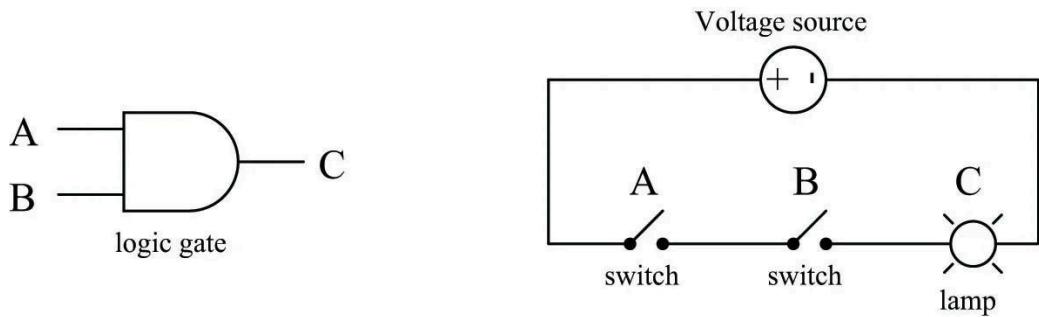


Figure 2 -

Une fonction « OU » est équivalente à des contacts normalement ouverts connectés en parallèle dans un circuit de commande de relais, car la lampe sera alimentée si l'interrupteur A ou l'interrupteur B est actionné :

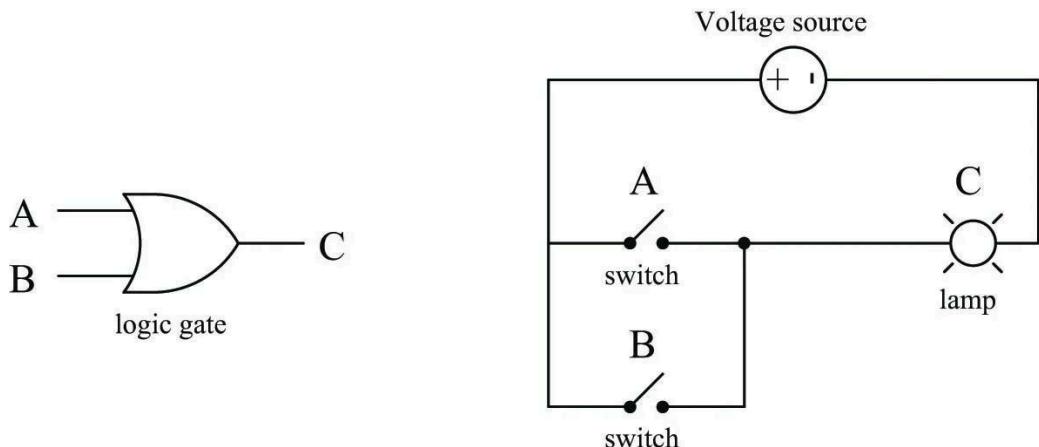


Figure 3 -

La fonction « NOT » est équivalente à un simple contact normalement fermé dans un circuit de commande de relais, car la lampe n'est alimentée que si l'interrupteur n'est pas actionné :

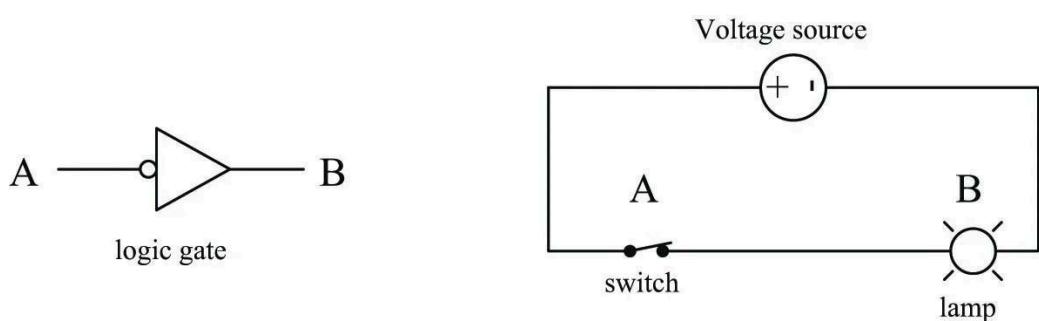


Figure 4 -

4.1 Les bases des relais de contrôle



Les relais sont des dispositifs électromécaniques magnétiques qui ont deux fonctions principales : isoler différentes tensions de circuit et former des réseaux logiques complexes plus importants pour faire fonctionner des machines sans contrôleurs numériques.

Un relais électromécanique est un interrupteur électrique actionné par une bobine d'électroaimant. En tant que dispositifs de commutation, ils présentent un comportement simple de « marche » et « arrêt », sans états intermédiaires. Les relais sont des dispositifs très utiles, car ils permettent à un seul signal électrique discret (marche/arrêt) de contrôler des niveaux de puissance électrique beaucoup plus importants, et/ou plusieurs signaux de puissance ou de commande qui sont autrement isolés les uns des autres. Par exemple, un relais peut être commandé par un signal basse tension et basse intensité qui passe par une sorte de commutateur délicat (par exemple, un interrupteur de fin de course, un détecteur de proximité, un capteur optique), puis les contacts de commutation de ce relais peuvent être utilisés pour commander un circuit de tension et d'intensité beaucoup plus élevées, et même plusieurs circuits, compte tenu des multiples jeux de contacts de commutation.

4.1.1 Symboles schématiques pour les relais

- Relais unipolaire unidirectionnel (relais SPST)

Le symbole du schéma électronique d'un relais unipolaire simple (SPST) est illustré ici :

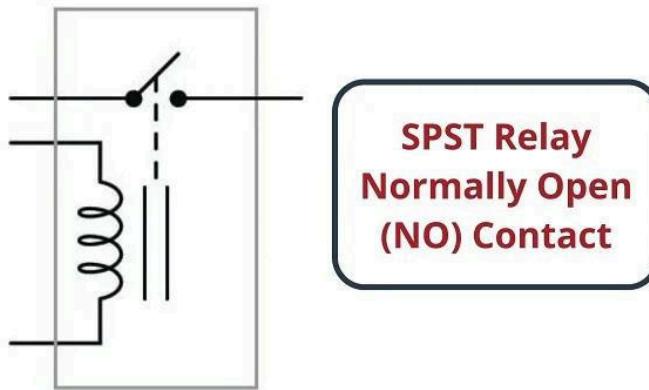


Figure 5 -

Une bobine de fil enroulée autour d'un noyau ferreux laminé fournit le champ magnétique nécessaire pour actionner le mécanisme de commutation, alimenté par une tension alternative ou continue, selon le modèle. L'influence de cette bobine d'électroaimant sur le(s) contact(s) du relais est représentée par la ligne en pointillés. Ce relais particulier est équipé de contacts de commutation normalement ouverts (NO), ce qui signifie que le commutateur sera à l'état ouvert (off) lorsque la bobine du relais est désexcitée. Rappelons que l'état « normal » d'un interrupteur est l'état de repos sans stimulation. Le contact d'un interrupteur à relais est dans son état « normal » lorsque sa bobine n'est pas alimentée. Un relais unipolaire, unidirectionnel avec un contact de commutation normalement fermé (NC) serait représenté dans un schéma électronique comme suit :

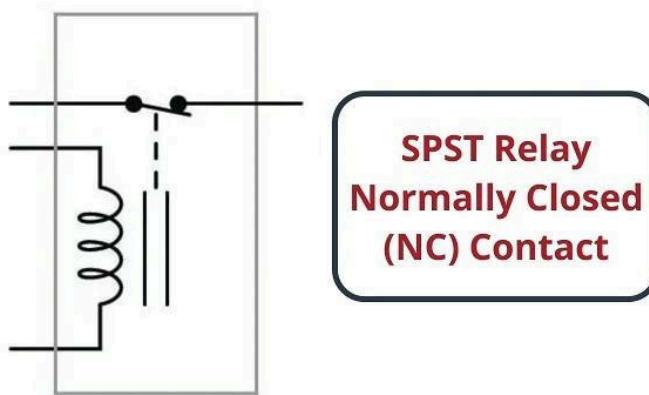


Figure 6 -

Dans le monde du contrôle électrique, les étiquettes « Form-A » et « Form-B » sont synonymes de contacts « normalement ouverts » et « normalement fermés », respectivement. Ainsi, nous aurions pu étiqueter les contacts des relais SPST comme « Forme-A » et « Forme-B », respectivement :

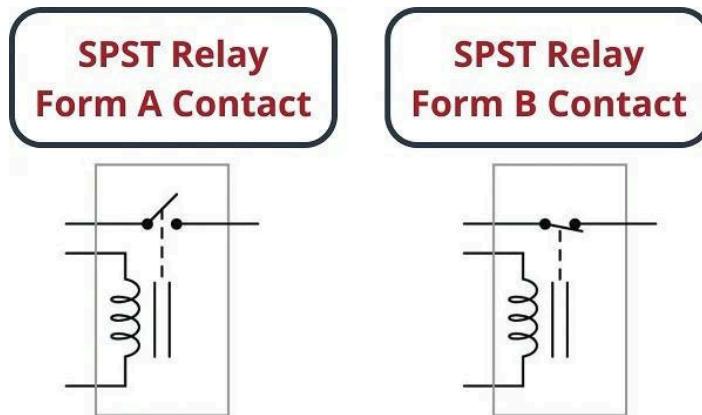


Figure 7 -

- **Relais unipolaire et bipolaire (relais SPDT)**

Une extension de ce thème est le contact de relais unipolaire et bipolaire (SPDT), également connu sous le nom de contact « Form-C ». Ce type d'interrupteur fournit un ensemble de contacts normalement ouverts et normalement fermés en une seule unité, actionnée par la bobine de l'électro-aimant :

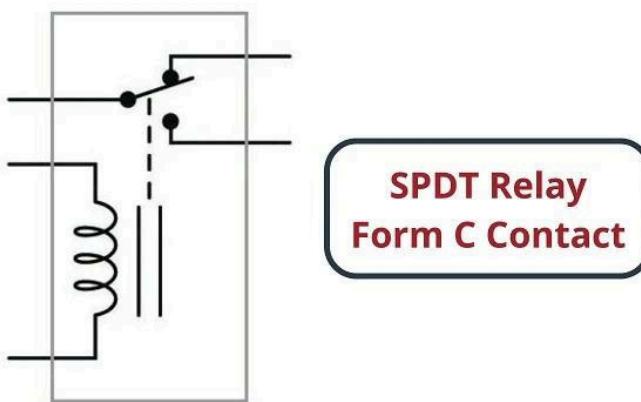


Figure 8 -

- Relais bipolaire à double contact (relais DPDT)

Une autre extension de ce thème est le contact de relais double pôle, double lance (DPDT). Ce type d'interrupteur fournit deux jeux de contacts de forme C en une seule unité, actionnés simultanément par la bobine de l'électro-aimant :

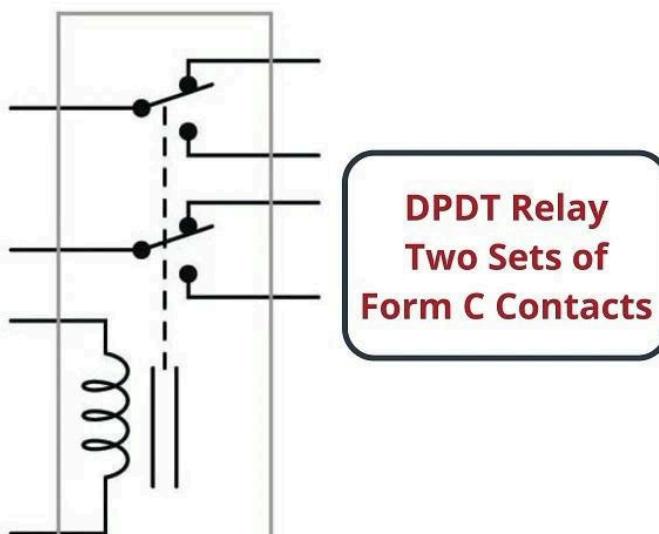


Figure 9 -

Les relais DPDT sont parmi les types de relais les plus courants dans l'industrie en raison de leur polyvalence. Chaque jeu de contacts de « forme C » offre un choix de contacts normalement ouverts ou normalement fermés, et les deux jeux (deux « pôles ») sont électriquement isolés l'un de l'autre de sorte qu'ils peuvent être utilisés dans des circuits différents.

Deux boîtiers courants pour les relais industriels sont le relais octal et le relais glaçon. Ces relais se branchent sur des socles multibroches pour faciliter le retrait et le remplacement en cas de défaillance, et contiennent généralement des boîtiers en plastique transparent permettant d'inspecter les éléments fonctionnels. Les photos suivantes montrent un relais octal DPDT prêt à être branché sur son socle, puis dont le couvercle en plastique a été retiré pour exposer les deux jeux de contacts de forme C :



Figure 10 -

Ces relais se connectent à l'embase avec huit broches : trois pour chacun des deux jeux de contacts de forme C, plus deux autres broches pour les connexions de la bobine. En raison du nombre de broches (8), ce type d'embase de relais est généralement réservé aux connexions de type DPDT.

Une vue rapprochée d'un contact de forme C montre comment la « feuille » métallique mobile entre en contact avec l'un des deux points fixes, le point de contact réel étant constitué par un « bouton » recouvert d'argent à l'extrémité de la feuille. Les photographies suivantes montrent un contact de forme C dans les deux positions :

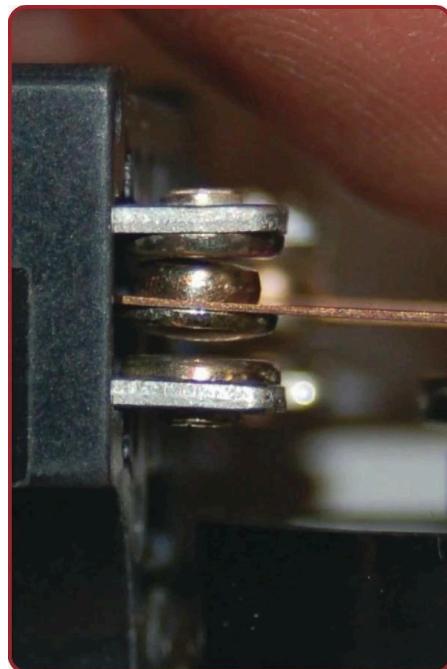


Figure 11 -

The “**ice cube**” relay is functionally identical, but the pins are arranged in a rectangular pattern, rather than circular around the base. These relays can be found in single and double-pole varieties, and even up to 4 contact sets (4PDT) is fairly common. The below images show a standard From-C DPDT ice cube relay followed by a 4PDT with the matching socket.



Figure 12 -

Schéma de connexion Les relais de commande industriels ont généralement des schémas de connexion dessinés quelque part sur l'enveloppe extérieure pour indiquer quelles broches se connectent à quels éléments à l'intérieur du relais. Le style de ces diagrammes peut varier quelque peu, même entre des relais de fonction identique. Prenons par exemple le diagramme illustré ici:

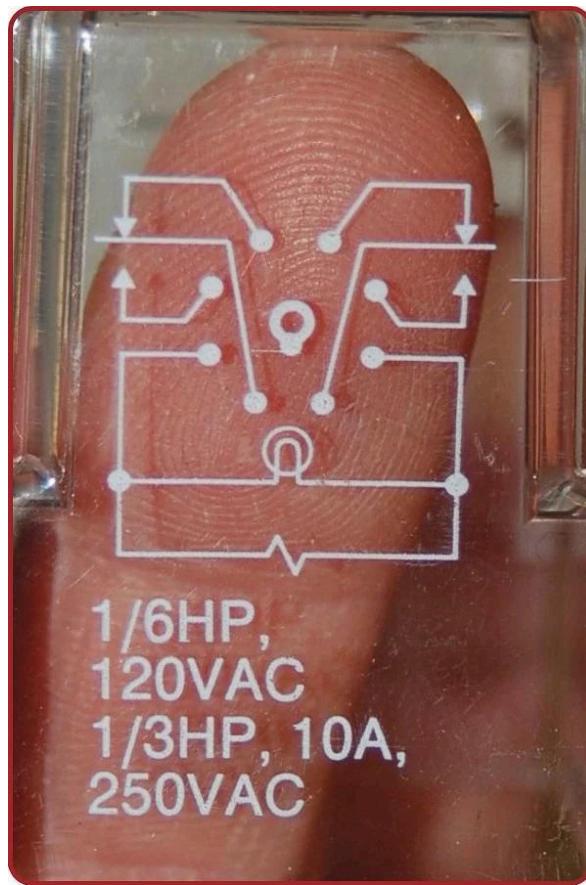


Figure 13 -

4.1.2 Circuits de relais et Ladder Diagrams

Les circuits logiques à relais, souvent représentés par des ladder diagrams, sont un élément essentiel des systèmes de contrôle industriel. Ces circuits utilisent des relais et des interrupteurs pour contrô-

ler divers dispositifs électriques en fonction de conditions d'entrée spécifiques. Le format du ladder diagram est populaire car il reflète visuellement la disposition des panneaux de commande à relais physiques, ce qui permet aux ingénieurs et électriciens de comprendre et de résoudre facilement les problèmes. Le diagramme se compose de lignes verticales (L1 et L2) représentant l'alimentation électrique, avec des échelons horizontaux qui les relient, chaque échelon représentant un chemin logique de contrôle. Chaque échelon dans le ladder diagram sert de circuit de commande pour un dispositif de sortie spécifique, tel qu'une lumière, un moteur ou une alarme.

Les dispositifs montrés dans les ladder diagrams comprennent généralement des dispositifs de commande comme des interrupteurs, des capteurs et des relais, qui sont placés entre les rails d'alimentation (L1 et L2). Les dispositifs d'entrée, tels que les boutons-poussoirs ou les interrupteurs de limite, sont utilisés pour déterminer l'état du dispositif de sortie. Ces dispositifs d'entrée sont connectés en série ou en parallèle, selon la logique requise. Un agencement en série signifie que toutes les conditions doivent être vraies (ou « fermées ») pour que le dispositif de sortie s'active, tandis qu'un agencement en parallèle permet à la sortie de s'activer si l'une des conditions est remplie. Cette flexibilité fait de la logique à relais un choix idéal pour contrôler une grande variété de machines et de systèmes.

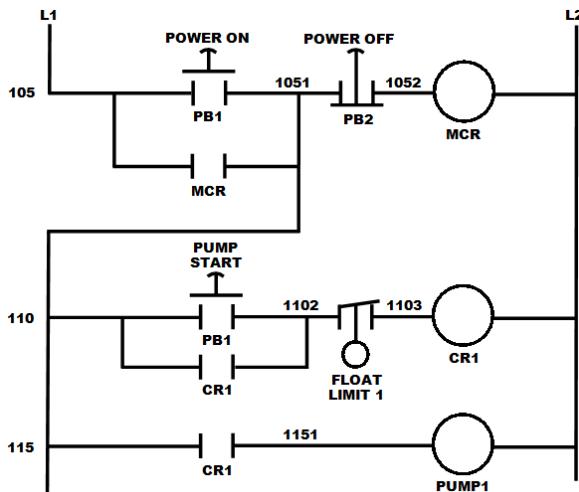


Figure 14 - Exemple de diagramme logique Ladder

Une caractéristique clé des ladder diagrams est l'utilisation de contacts normalement ouverts (NO) et normalement fermés (NF) pour représenter l'état des interrupteurs ou des relais. Les contacts NO restent ouverts lorsque le dispositif associé est déenergisé et se ferment lorsque le dispositif est énergisé. Les contacts NF, quant à eux, sont fermés lorsque le dispositif est éteint et s'ouvrent lorsqu'il est énergisé. Ce comportement permet de construire des conditions logiques dans le système de commande. Par exemple, un bouton STOP pourrait être câblé en série avec un relais pour empêcher le fonctionnement du système lorsqu'il est pressé, tandis qu'un bouton START pourrait être placé en parallèle avec d'autres éléments de commande pour démarrer le système sous certaines conditions.

Dans un système logique à relais typique, les dispositifs d'entrée et de sortie sont câblés pour contrôler l'état du système. Le bouton START pourrait activer un relais, ce qui, à son tour, fermerait des contacts pour allumer une lumière pilote ou un moteur. À l'inverse, le bouton STOP désactiverait le relais, faisant ouvrir les contacts et éteignant les dispositifs connectés. La beauté de ce système réside dans sa simplicité et sa flexibilité. Plusieurs échelons peuvent être ajoutés pour gérer

des besoins de commande plus complexes, tels que des verrouillages, des temporiseurs ou des opérations séquentielles. Chaque échelon est identifié par un numéro de référence unique, et les fils individuels de cet échelon reçoivent des numéros correspondants pour un suivi facile et une maintenance efficace.

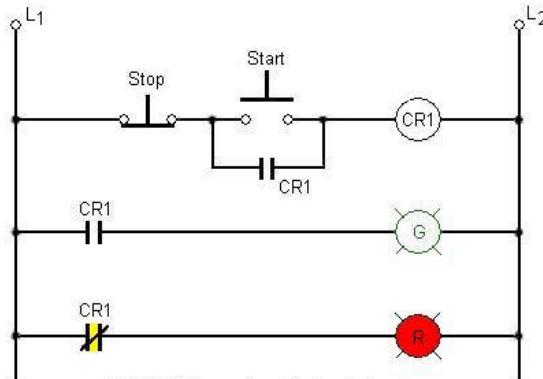


FIGURE 1 Example of relay logic diagram.

Figure 15 - Exemple de diagramme logique Ladder

4.2 Contacteurs et relais - Différences et applications

Les relais et les contacteurs sont des composants fondamentaux dans l'automatisation industrielle, largement utilisés pour contrôler des circuits haute tension avec des signaux basse tension. Bien qu'ils fonctionnent sur des principes similaires d'induction électromagnétique, ils ne sont pas interchangeables en raison de leurs différences en termes de conception, d'application et de fonction. Examinons de plus près leurs principes de fonctionnement, leurs différences et les rôles spécifiques des relais et des contacteurs dans les circuits industriels.



Figure 16 -

4.2.1 Principes de fonctionnement des relais et des contacteurs

Les relais et les contacteurs fonctionnent tous deux en utilisant une bobine électromagnétique. Lorsqu'un courant passe dans la bobine, un champ magnétique est généré, ce qui déplace un fer-blanc (armature) qui ouvre ou ferme un jeu de contacts, permettant ou interrompant ainsi le passage du courant dans un circuit. En termes simples, ils agissent comme des interrupteurs qui permettent à un circuit de commande basse puissance de contrôler des appareils haute puissance tels que des moteurs, des lumières ou d'autres machines.

Le fonctionnement est similaire : lorsqu'un petit courant passe à travers la bobine, il génère un champ magnétique qui attire ou repousse l'armature, provoquant l'ouverture ou la fermeture des contacts. Cette modification de l'état des contacts permet de contrôler le fonctionnement d'un courant beaucoup plus important dans le circuit principal.

• Différences entre relais et contacteurs

Bien qu'ils partagent un principe de fonctionnement similaire, les **relais** et les **contacteurs** sont conçus pour des objectifs et des environnements différents.



Figure 17 -

1. Taille et capacité de courant :

- Les **relais** sont généralement plus petits et conçus pour commuter des courants faibles, souvent dans des circuits de commande où le courant est relativement faible (par exemple, inférieur à 10-20 ampères). Ils sont couramment utilisés pour des fonctions de commande et de signalisation.
- Les **contacteurs**, quant à eux, sont conçus pour supporter des courants plus élevés (généralement au-dessus de 10-20 ampères), ce qui les rend idéaux pour la commutation de circuits haute puissance tels que des moteurs, des machines lourdes et des équipements industriels. Les contacteurs sont généralement plus grands, plus robustes et conçus pour supporter l'usure liée à la commutation de circuits de haute puissance.

2. Configuration des contacts :

- Les **relais** ont généralement quelques contacts, généralement un ou deux jeux de contacts normalement ouverts (NO) ou normalement fermés (NF). Leurs contacts sont utilisés principalement dans des circuits de commande où moins de commutations sont nécessaires.
- Les **contacteurs** ont généralement davantage de contacts (souvent trois ou plus) et sont conçus pour les systèmes électriques triphasés. Leurs contacts sont conçus pour supporter l'arc électrique et l'usure qui se produisent lorsqu'ils commutent des circuits haute puissance.

3. Durabilité et longévité :

- **Les relais** ne sont généralement pas conçus pour supporter des commutations fréquentes dans des applications de haute puissance. Bien qu'ils puissent fonctionner à des fréquences modérées, ils ne sont pas conçus pour les cycles de commutation fréquents rencontrés dans des applications de machines lourdes.
- **Les contacteurs** sont conçus pour une grande durabilité, capables de supporter des milliers à des millions de cycles de commutation. Les contacts sont conçus pour résister aux arcs électriques générés lors de la commutation de circuits haute puissance, ce qui est fréquent lorsqu'on contrôle des moteurs et des charges lourdes.

4. Fonctions auxiliaires :

- **Les relais** sont souvent utilisés dans des circuits pour des fonctions telles que les temporisations, le contrôle logique et la commutation simple d'appareils de faible puissance. Ils sont souvent équipés de contacts auxiliaires qui permettent des fonctionnalités de commande supplémentaires.
- **Les contacteurs** sont équipés de contacts auxiliaires plus robustes pour des fonctions spécifiques comme la protection contre les surcharges, le contrôle à distance et la surveillance de l'état, ce qui les rend adaptés aux systèmes industriels plus grands et plus complexes.

5. Protection et sécurité :

- **Les relais** sont généralement plus simples et peuvent manquer de certaines fonctions de protection. Ils sont conçus pour des tâches de commande relativement légères, donc des protections supplémentaires comme des relais de surcharge ou des fusibles sont souvent utilisés en complément des relais.
- **Les contacteurs** sont souvent équipés de protection contre les surcharges intégrée ou sont conçus pour être associés à des relais de surcharge, assurant ainsi la protection des circuits qu'ils contrôlent. Cela est essentiel dans les environnements industriels où la sécurité des équipements est primordiale.

4.2.2 Applications clés

- **Les relais** sont couramment utilisés dans :
 - Les circuits de commande pour commuter des dispositifs plus petits comme des alarmes, des lumières ou des petits moteurs.
 - Les systèmes de commande logique où une fonction simple de marche/arrêt est requise.
 - Les opérations avec retard, où des dispositifs doivent être activés ou désactivés après une durée déterminée.
- **Les contacteurs** sont généralement utilisés dans :
 - La commutation de grandes machines, de moteurs et d'équipements industriels nécessitant des opérations fréquentes de marche/arrêt.
 - Le contrôle de circuits haute puissance dans les systèmes d'automatisation industrielle comme les systèmes de CVC, les convoyeurs ou les pompes industrielles.
 - Les applications nécessitant une opération fréquente et des composants robustes et durables pour gérer des charges importantes.

Les symboles pour les appareils respectifs sont présentés ci-dessous. Les symboles sont utilisés pour représenter les composants dans les schémas électriques et les diagrammes de commande, comme les relais et contacteurs, permettant de les identifier facilement dans les circuits.

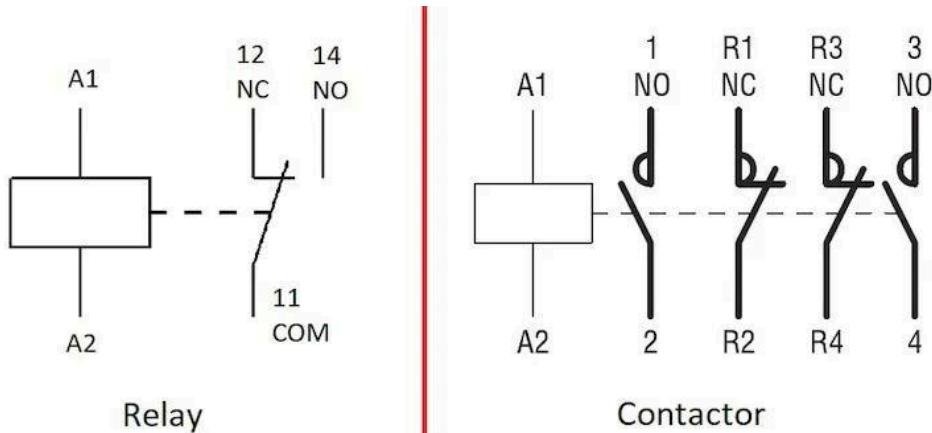


Figure 18 -

Bien que les relais et les contacteurs soient des dispositifs électromécaniques utilisés pour contrôler le flux d'électricité dans les circuits, ils remplissent des fonctions différentes dans l'automatisation industrielle. Les relais conviennent aux applications de faible puissance et de commande, tandis que les contacteurs sont conçus pour gérer des opérations de commutation haute puissance et des charges lourdes. Comprendre les différences entre eux est essentiel pour les ingénieurs en automatisation afin de sélectionner le bon composant pour chaque application spécifique. Bien que relais et contacteurs fonctionnent sur des principes électromagnétiques similaires, leurs différences de taille, de configuration de contacts et de durabilité font qu'ils ne peuvent pas être utilisés de manière interchangeable dans tous les scénarios.

4.2.3 Explorer les types de relais électriques

Dans cette section, nous allons vous présenter les différents types de relais et leurs utilisations spécifiques. Voyons ce qu'il en est.



Figure 19 - les différents types de relais

• Relais électromagnétique

- Qu'est-ce que c'est ? Le type le plus courant, qui utilise un électro-aimant pour ouvrir ou fermer les contacts.
- Où est-il utilisé ? Largement répandu dans les systèmes de contrôle industriels, les circuits électriques et les applications automobiles.
- Pourquoi c'est important : Idéal pour les circuits haute tension et les applications lourdes en raison de la fiabilité de sa commutation.

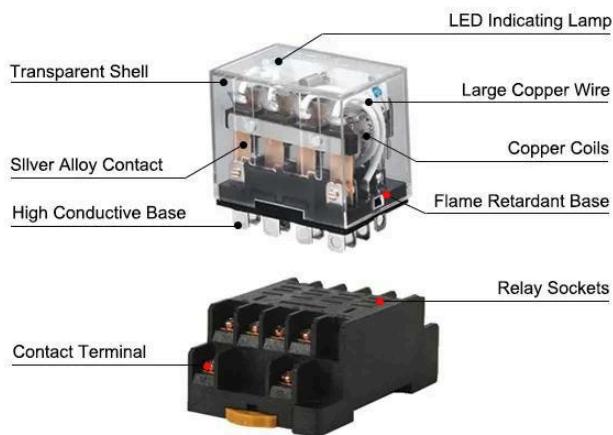


Figure 20 - Relais électromagnétique

• Relais statique (SSR)

- Qu'est-ce que c'est ? Un relais sans pièces mobiles, utilisant des semi-conducteurs au lieu d'un interrupteur mécanique.
- Domaines d'application : Idéal pour un fonctionnement silencieux dans l'électronique sensible, comme l'automatisation et les machines industrielles.
- Pourquoi c'est important ? Commutation plus rapide, durée de vie plus longue et absence d'usure grâce à sa nature à l'état solide.



Figure 21 - Relais statique (SSR)

• Relais thermique

- Qu'est-ce que c'est ? Il protège les circuits contre la surchauffe en détectant les hausses de température.
- Où est-il utilisé ? Principalement dans les circuits de moteur pour éviter les surcharges et les dommages.
- Pourquoi c'est important ? Indispensable pour protéger les moteurs et assurer la longévité des équipements en coupant l'alimentation en cas de surchauffe.



Figure 22 - Relais thermique

• Relais différentiel

- Qu'est-ce que c'est ? Un relais qui compare les courants d'entrée et de sortie pour détecter les défauts.
- Où l'utilise-t-on ? Protection des transformateurs, des générateurs et des sous-stations électriques.
- Pourquoi c'est important ? Essentiel pour prévenir les dommages en identifiant rapidement les défauts électriques.



Figure 23 - Relais différentiel

• Reed Relay

- Qu'est-ce que c'est ? Un relais à commutation rapide et à haute sensibilité, utilisant des contacts magnétiques enfermés dans un tube de verre.
- Domaines d'application : Télécommunications, systèmes de signalisation et commutation de faible puissance.
- Pourquoi c'est important : Parfait pour les applications à faible puissance et à grande vitesse où la précision est cruciale.

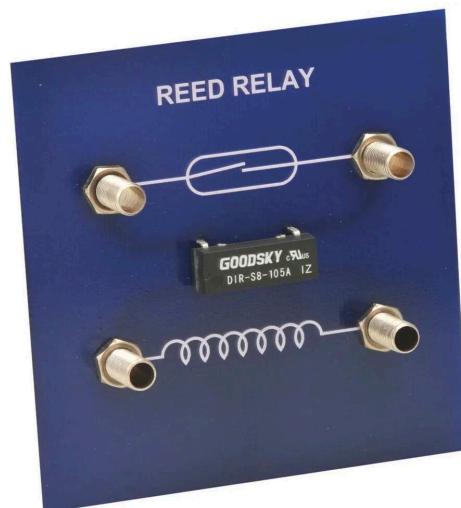


Figure 24 - Reed Relay

• Relais à verrouillage

- Qu'est-ce que c'est ? Reste dans son dernier état (marche ou arrêt) même après la suppression du signal de commande.
- Domaines d'application : Idéal pour les circuits où le relais doit rester en position sans alimentation continue, comme les systèmes d'éclairage.
- Pourquoi c'est important : Économique en énergie et efficace pour les circuits à mémoire qui doivent maintenir leur état en cas de perte d'alimentation.



Figure 25 - Relais à verrouillage

- Relais de séquence de phase

- Qu'est-ce que c'est ? Surveille la séquence des phases dans les systèmes triphasés pour garantir l'ordre correct des phases.
 - Domaines d'application : Protection des moteurs triphasés, systèmes industriels et réseaux de distribution d'énergie.
 - Pourquoi c'est important : Empêche les moteurs de fonctionner en sens inverse et assure le bon fonctionnement de l'équipement.



Figure 26 - Relais de séquence de phase

- Relais temporisé

- Qu'est-ce que c'est ? Introduit une temporisation entre l'activation et la commutation des contacts.
 - Domaines d'application : Systèmes d'automatisation, bandes transporteuses et séquences de démarrage des moteurs.
 - Pourquoi c'est important ? Essentiel pour les opérations qui nécessitent une synchronisation précise, garantissant que les machines démarrent ou s'arrêtent avec des délais contrôlés.



Figure 27 - Relais temporisé

• Relais à distance

- Qu'est-ce que c'est ? Il mesure l'impédance d'une ligne de transmission pour détecter les défauts à différentes distances de l'emplacement du relais.
- Domaines d'application : Protection des lignes de transmission dans les réseaux de distribution d'électricité.
- Pourquoi c'est important ? Assure la protection des lignes électriques à longue distance en détectant rapidement les défauts. en détectant rapidement les défauts.



Figure 28 - Relais à distance

• Relais de fréquence

- Qu'est-ce que c'est ? Il surveille la fréquence d'un système électrique et s'active si elle sort de la plage autorisée.
- Domaines d'application : Protection des réseaux électriques, systèmes d'énergie renouvelable.
- Pourquoi c'est important : Maintient la stabilité du système en assurant une fréquence constante, ce qui est crucial pour les opérations du réseau électrique.



Figure 29 - Relais de fréquence

• Relais de tension

- Qu'est-ce que c'est ? S'active lorsque la tension atteint un niveau prédéfini, protégeant ainsi les circuits des conditions de sous-tension ou de surtension.
- Domaines d'application : Systèmes de distribution d'énergie et de réseau pour stabiliser la tension.
- Pourquoi c'est important : Assure la protection des équipements sensibles en maintenant la tension dans des limites sûres.



Figure 30 - Relais de tension

• Relais de courant

- Qu'est-ce que c'est ? Déetecte et réagit lorsque le courant dans un circuit dépasse un seuil prédéfini.
- Domaines d'application : Protection des moteurs, protection contre les surcharges et gestion des systèmes d'alimentation.
- Pourquoi c'est important ? Protège les moteurs et autres équipements électriques contre les surintensités, prolongeant ainsi leur durée de vie.



Figure 31 - Relais de courant

4.2.4 Interposition des relais dans les automates



Les relais présentent un avantage certain par rapport à de nombreux dispositifs à semi-conducteurs en ce qu'ils assurent l'isolation entre les circuits. Des tensions et des courants différents peuvent être « interposés » pour assurer la sécurité, l'efficacité et la compatibilité entre les systèmes.

Outre l'exécution directe de fonctions logiques, les relais électromécaniques peuvent également être utilisés comme dispositifs d'interposition entre des capteurs, des contrôleurs et/ou des dispositifs de contrôle mal adaptés. Un exemple très simple d'utilisation d'un relais pour intercaler des dispositifs mal adaptés est illustré dans le schéma de circuit suivant, où un délicat interrupteur à bascule est utilisé pour commander une batterie de feux à haute puissance pour un véhicule tout-terrain :

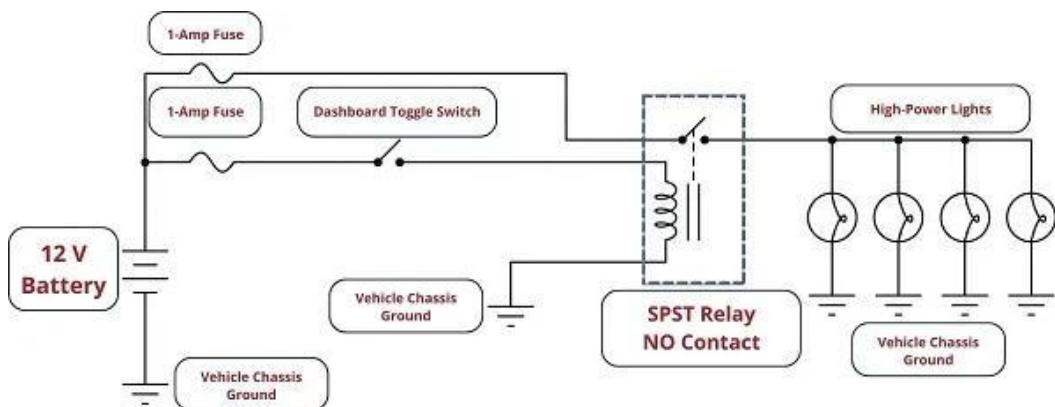


Figure 32 - Relais de courant

Dans ce circuit, le relais ne remplit aucune fonction logique. Il se contente d'« amplifier » le signal envoyé par l'interrupteur à bascule du tableau de bord pour envoyer ou interrompre l'alimentation de la batterie de lampes à haute puissance. Sans le relais, il faudrait installer un interrupteur à bascule beaucoup plus robuste sur le tableau de bord de ce véhicule pour activer et désactiver le circuit d'éclairage de manière sûre et fiable.

- **Relais d'interposition pour la sécurité**

Un autre exemple de relais d'interposition que l'on trouve dans les applications automobiles est l'utilisation d'un « solénoïde » dans le circuit du moteur de démarrage électrique d'un moteur à combustion interne. Le commutateur de commande de « démarrage » est généralement actionné par le conducteur qui tourne une clé, ce commutateur étant monté sur la colonne de direction ou le tableau de bord du véhicule. Le moteur de démarrage, quant à lui, consomme généralement des centaines d'ampères de courant lorsqu'il s'efforce de démarrer le moteur. Un interrupteur à clé capable d'établir et de couper des centaines d'ampères de courant serait énorme et assez dangereux à placer dans la cabine du véhicule. Le relais « solénoïde » connecté entre le commutateur à clé et le moteur de démarrage élimine ce danger et permet à un commutateur à clé relativement délicat d'activer en toute sécurité le moteur à haute puissance.

Il convient de noter que, bien que les relais de contrôle puissent être interposés pour des raisons de sécurité, cela n'est pas synonyme de la catégorie de dispositifs appelés « relais de sécurité », avec des ensembles redondants de bobines d'entrée et d'ensembles de contacts qui répondent

à des réglementations de sécurité strictes, normalement pour des applications de moteur et de mouvement.

• Relais de conversion de tension alternative en tension continue

Voici un exemple industriel de relais d'interposition entre des dispositifs mal adaptés : un détecteur de proximité à sortie AC doit déclencher un canal d'entrée vers un automate programmable (PLC) conçu pour 24 volts DC seulement :

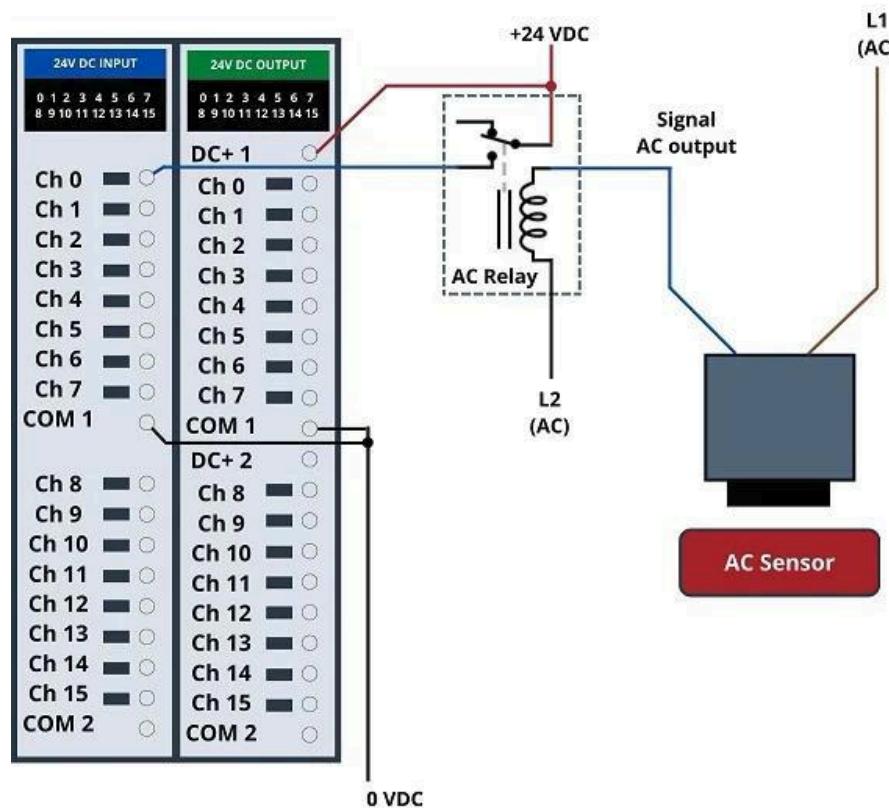


Figure 33 - Relais de courant

Là encore, le relais de ce système ne remplit aucune fonction logique, mais permet simplement au détecteur de proximité de piloter l'un des canaux d'entrée de l'automate. Connecter directement le détecteur de proximité à l'un des canaux d'entrée de l'automate n'est pas une option pratique (ou sûre) car cette entrée particulière de l'automate nécessite 24 volts CC pour être activée, et notre détecteur de proximité fonctionne sur 120 volts CA, ce qui risquerait d'endommager ou de détruire l'entrée de l'automate. Le décalage entre la tension du commutateur et la tension d'entrée de l'automate nous oblige à utiliser le relais pour « s'interposer » entre le commutateur et l'automate. Lorsque le détecteur de proximité détecte un objet à proximité, sa sortie s'active, ce qui alimente la bobine du relais. Lorsque le contact du relais se ferme magnétiquement, il complète un circuit de 24 volts CC pour atteindre le canal d'entrée 0 de l'automate, ce qui le met sous tension.

• Amplification du courant avec des relais

Les relais d'interposition sont également utilisés pour connecter des sorties d'API et des dispositifs de commande non compatibles. Dans cette application, l'inadéquation peut concerner les tensions nominales et/ou les courants nominaux. Comme pour le circuit d'interposition d'entrée présenté précédemment, la tâche du relais dans un circuit d'interposition de sortie est d'être contrôlé par le

canal de sortie de l'API et, à son tour, de diriger l'alimentation vers un dispositif de terrain qui est lui-même incompatible avec la sortie de l'API.

Le schéma suivant montre un exemple de relais d'interposition connecté à un canal de sortie d'API pour « amplifier » la sortie de courant :

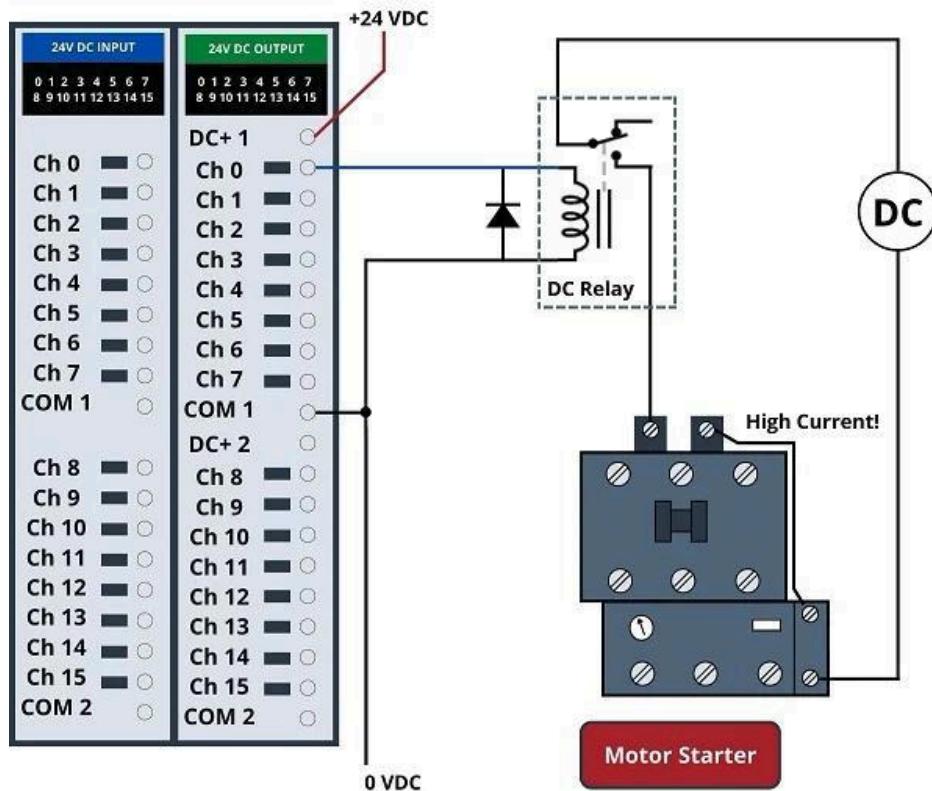


Figure 34 - Relais de courant

Dans ce circuit, les sorties à transistor discret de l'automate ne peuvent gérer qu'une petite quantité de courant continu. La bobine du contacteur triphasé nécessite des niveaux de courant modestes pour fonctionner, et le relais s'interpose donc entre le canal de sortie à faible courant de l'API et les demandes de courant relativement plus élevées de la bobine du contacteur. De nombreux dispositifs de charge consommeraient beaucoup plus de courant, et la capacité d'amplifier le courant est une application clé des dispositifs à relais.

• Diode de commutation (diode Flyback)

Un détail important de ce circuit de relais est l'inclusion d'une diode de commutation, ou diode flyback, en parallèle avec la bobine du relais, dans le but de dissiper l'énergie stockée dans la bobine au moment de la désexcitation lorsque le détecteur de proximité s'éteint. Sans cette diode, la tension de retour de la bobine (qui peut atteindre des centaines de volts) détruira le transistor de sortie du détecteur de proximité.

Notez que cette diode de commutation semble être connectée « à l'envers » par rapport à la polarité de la source de courant continu de 24 volts : la cathode est orientée vers le pôle positif de la source et l'anode vers le pôle négatif de la source. C'est intentionnel, car nous ne souhaitons pas que la diode fonctionne lorsque le courant est appliqué à la bobine du relais par l'intermédiaire du détecteur de proximité. La diode ne s'allume que lorsque la polarité s'inverse, ce qui se produit lorsque

l'interrupteur de proximité s'éteint et que le champ magnétique de la bobine de relais s'effondre (agissant désormais comme une source et non plus comme une charge). Comme la bobine du relais émet temporairement une tension « inverse », la diode fournit à cette bobine un chemin continu pour son courant tout en laissant tomber une faible tension (environ 0,7 volt DC), dissipant l'énergie stockée de la bobine sous forme de chaleur au niveau de la diode.

4.3 conclusion

Les systèmes à relais ont joué un rôle essentiel dans l'automatisation industrielle avant l'arrivée des contrôleurs logiques programmables (PLC). Leur principal avantage réside dans leur simplicité et leur fiabilité pour des applications de contrôle basiques. Les relais sont des composants électromécaniques faciles à comprendre et à utiliser, ce qui les rend accessibles même pour les techniciens débutants. Ils sont également peu coûteux à l'achat, ce qui en fait une option économique pour des systèmes de contrôle simples. De plus, les relais sont robustes et peuvent fonctionner dans des environnements difficiles, comme des températures élevées ou des conditions de vibration, tout en étant moins sensibles aux interférences électromagnétiques que certains systèmes électroniques modernes. Ces caractéristiques en font une solution fiable pour des applications à petite échelle ou peu complexes.

Cependant, les systèmes à relais présentent des limites significatives, notamment lorsqu'ils sont utilisés pour des applications à grande échelle ou complexes. Leur principal inconvénient est la complexité du câblage et de la maintenance. Plus le nombre de relais augmente, plus le système devient difficile à gérer, avec des schémas de câblage souvent enchevêtrés et difficiles à dépanner. De plus, les relais sont des dispositifs mécaniques sujets à l'usure, ce qui nécessite une maintenance fréquente pour éviter les pannes. Une autre limitation majeure est leur manque de flexibilité : toute modification de la logique de contrôle ou ajout de nouvelles fonctions nécessite un récâblage physique, ce qui est à la fois coûteux et chronophage. Ces contraintes rendent les systèmes à relais peu adaptés aux environnements industriels modernes, où la flexibilité et l'évolutivité sont essentielles.

En conclusion, les systèmes à relais ont été une solution fiable et économique pour l'automatisation industrielle pendant des décennies, en particulier pour des applications simples et à petite échelle. Cependant, leur complexité croissante dans les systèmes plus grands, leur manque de flexibilité et leurs besoins de maintenance fréquente en limitent l'utilité dans les environnements industriels modernes. Avec l'avènement des PLC et d'autres technologies avancées, les systèmes à relais ont été largement remplacés, bien qu'ils restent pertinents dans certains contextes spécifiques où la simplicité et le faible coût sont prioritaires.

5 | Les Automates Programmables Industriels (API)

5.1 Introduction

Les Automates Programmables Industriels (API) sont apparus aux Etats-Unis vers 1969 où ils répondent aux désirs des industries de l'automobile de développer des chaînes de fabrication automatisées qui pourraient suivre l'évolution des techniques et des modèles fabriqués.

Un Automate Programmable Industriel (API) est une machine électronique programmable par un personnel non informaticien et destiné à piloter en ambiance industrielle et en temps réel des procédés industriels. Un automate programmable est adaptable à un maximum d'application, d'un point de vue traitement, composants, language. C'est pour cela qu'il est de construction modulaire.

Il est en général manipulé par un personnel électromécanicien. Le développement de l'industrie a entraîné une augmentation constante des fonctions électroniques présentes dans un automatisme c'est pour ça que l'API s'est substitué aux armoires à relais en raison de sa souplesse dans la mise en œuvre, mais aussi parce que dans les coûts de câblage et de maintenance devaient trop élevés.

5.2 Pourquoi l'automatisation ?

L'automatisation permet d'apporter des éléments supplémentaires à la valeur ajoutée par le système. Ces éléments sont exprimables en termes d'objectifs par :

- Accroître la productivité (rentabilité, compétitivité) du système.
- Améliorer la flexibilité de production.
- Améliorer la qualité du produit.
- Adaptation à des contextes particuliers tel que les environnements hostiles pour l'homme (milieu toxique, dangereux.. nucléaire...), adaptation à des tâches physiques ou intellectuelles pénibles pour l'homme (manipulation de lourdes charges, tâches répétitives parallélisées...).
- Augmenter la sécurité, etc...

5.3 Structure générale des API

Les systèmes API sont principalement disponibles sous deux formes : en boîtier unique et en version modulaire/rack. Les systèmes non modulaires ont un nombre d'entrées sorties fixe (entre 10 et 30 E/S), avec souvent des performances limitées, ce sont les gammes les moins onéreuses. La majorité des installations comporte une solution modulaire, permettant grâce à des extensions d'étendre les E/S de l'automate ainsi que les interfaces de communications.

Un API modulaire est constitué de modules séparés pour : l'alimentation, le processeur, les entrées/sortie, les interfaces de communication. Les modules sont branchés les uns à la suite des autres dans un rack. Il suffit d'insérer un module sur le rack et de le configurer dans le logiciel pour l'ajouter, le rack de fond fournit le bus de communication et l'alimentation du module.

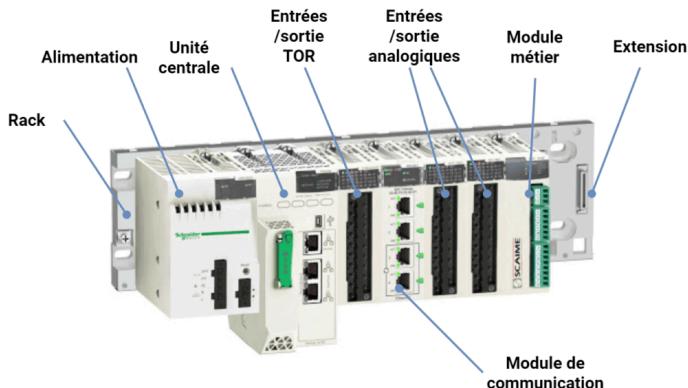


Figure 35 - Modicon M580

Les différents sous-ensembles sont :

- **Le rack/Châssis :** Certains châssis sont connus pour un montage en fond de panier, tandis que d'autres le sont pour un montage en rack. Il existe aussi des automates modulaires, sans châssis, où les modules se connectent les uns aux autres.
- **Unité centrale :** Les processeurs sont disponibles dans plusieurs variantes en termes de capacité d'E/S, de mémoires. Certaines unités peuvent comporter une ou plusieurs interfaces de communication, ainsi que quelque entrée/sortie. Un connecteur de communication permet la programmation de l'automate. L'unité centrale comporte régulièrement un mémoire externe (carte SD) et une pile pour garder la sauvegarde.
- **Entrées-sorties TOR :** Modules d'entrées/sortie digitale (tout ou rien), il existe en version 8, 16, 32 ou 64 E/S. Il existe avec des variantes de tensions, ou de courant admissibles. Les sorties peuvent être à commande à relais (puissance), ou à transistors.
- **Entrées-sorties analogiques :** Les modules d'entrées-sorties analogiques réalisent les conversions A/N et N/A, avec une résolution allant jusqu'à seize bits. Nous avons plusieurs gammes de tension/courant disponibles, les plus utilisés étant le 0-10V et le 4-20mA.
- **Modules de communication:** Des modules de communication peuvent être utilisés pour augmenter le nombre de ports de communication du processeur ou utiliser d'autres protocoles de communications.
- **Module métier :** les fabricants proposent des modules pour une utilisation plus spécifique ; comme le commande d'axe permettant d'assurer le positionnement avec précision d'un élément mécanique selon un ou plusieurs axes, le comptage rapide permettant d'acquérir des informations de fréquences élevées incompatibles avec le temps de traitement de l'automate ; la mesure de température.
- **Extensions :** il est possible d'étendre son rack par un autre rack, des entrées/sortie déportées par un bus de communication, ou un autre automate en esclaves.

5.4 Structure interne d'un automate programmable industriel (API)

Afin de recevoir les informations concernant l'état du système et de commander les préactionneurs selon le programme inscrit dans sa mémoire,

De manière générale, l'automate programmable industriel est composé de plusieurs éléments de base décrite ci-dessous :

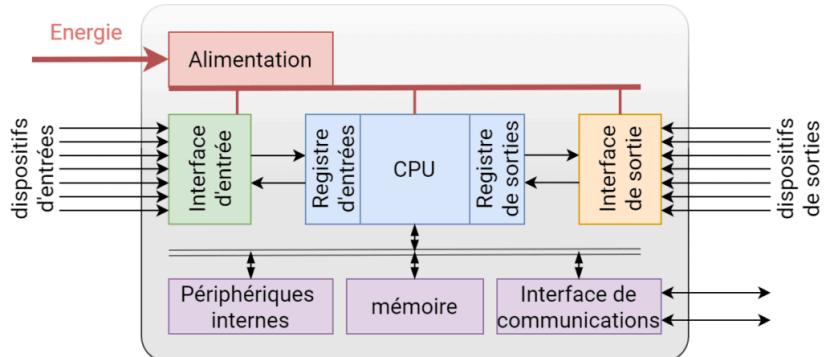


Figure 36 - Modicon M580

- **Un processeur (ou Central Processing Unit, CPU)** : Son rôle consiste à traiter les instructions qui constituent le programme de fonctionnement de l'application, à gérer les entrées et sorties, à surveiller et diagnostiquer l'automate (par des tests lancés régulièrement), à mettre en place un dialogue avec le terminal de programmation.
- **Une mémoire** : Elle permet le stockage des instructions constituant le programme de fonctionnement ainsi que diverses informations. Il peut s'agir de mémoire vive RAM (modifiable à volonté, mais perdue en cas de coupure de tension) ou de mémoire morte EEPROM (seule la lecture est possible).
- **Des interfaces entrées/sorties** : Elles permettent au processeur de recevoir et d'envoyer des informations. Ces dispositifs d'entrée et sortie peuvent produire des signaux discrets, numériques (ce sont des sorties de type « tout ou rien ») ou analogiques. Les dispositifs qui génèrent des signaux discrets ou numériques sont ceux dont les sorties sont de type tout ou rien. Par conséquent, un interrupteur est un dispositif qui produit un signal discret : présence ou absence de tension. Les dispositifs numériques peuvent être vus comme des dispositifs discrets qui produisent une suite de signaux tout ou rien. Les dispositifs analogiques créent des signaux dont l'amplitude est proportionnelle à la grandeur de la variable surveillée.
- **L'alimentation** : est indispensable puisqu'elle convertit une tension alternative en une basse tension continue (24V) nécessaire au processeur et aux modules d'entrées-sorties. L'alimentation ne fait pas toujours partie de l'automate qui sera donc directement alimenté par une base tension.
- **Interface de communication** : est utilisée pour recevoir et transmettre des données sur des réseaux de communication qui relient l'AP 1 à d'autres API distants ou à des équipements en fonction des protocoles choisis (voir le chapitre Protocole de communication industriel). Elle est impliquée dans des opérations telles que la vérification d'un périphérique, l'accès à la mémoire, la synchronisation entre des applications et la gestion de la connexion.
- **Périphérique de programmation** : est utilisé pour entrer le programme dans la mémoire du processeur. Ce programme est développé sur le périphérique, puis transfère dans la mémoire de l'API.

5.5 Fonctionnement des API

L'automate programmable reçoit les informations relatives à l'état du système et puis commande les pré-actionneurs suivant le programme inscrit dans sa mémoire. Généralement les automates programmables industriels ont un fonctionnement cyclique (Figure 3). Le microprocesseur réalise toutes les fonctions logiques ET, OU, les fonctions de temporisation, de comptage, de calcul... Il est connecté aux autres éléments (mémoire et interface E/S) par des liaisons parallèles appelées « BUS » qui véhiculent les informations sous forme binaire.. Lorsque le fonctionnement est dit

synchrone par rapport aux entrées et aux sorties, le cycle de traitement commence par la prise en compte des entrées qui sont figées en mémoire pour tout le cycle.

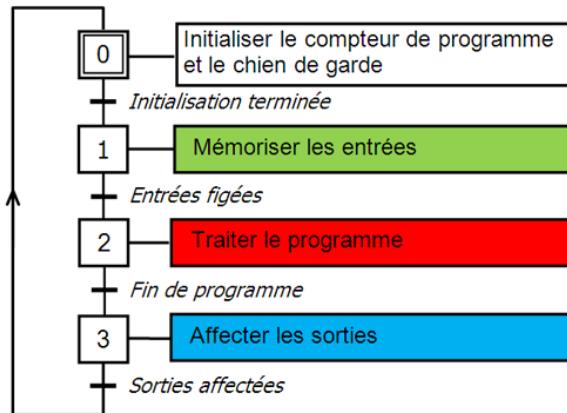


Figure 37 - Fonctionnement cyclique d'un API

Le processeur exécute alors le programme instruction par instruction en rangeant à chaque fois les résultats en mémoire. En fin de cycle les sorties sont affectées d'un état binaire, par mise en communication avec les mémoires correspondantes. Dans ce cas, le temps de réponse à une variation d'état d'une entrée peut être compris entre un ou deux temps de cycle (durée moyenne d'un temps de cycle est de 5 à 15 ms (Figure .4).

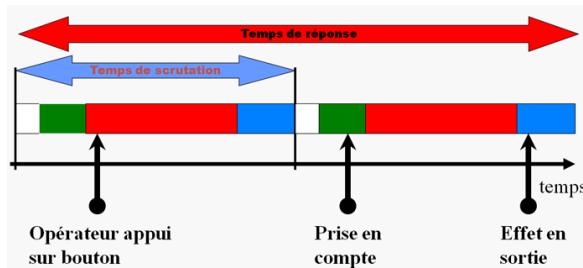


Figure 38 - Temps de scrutation vs Temps de réponse

Il existe d'autres modes de fonctionnement, moins courants :

- synchrone par rapport aux entrées seulement ;
- asynchrone.

5.6 Différence entre un automate compact et un automate modulaire.

5.6.1 PLC compact.

Les automates compacts sont des contrôleurs logiques programmables conçus pour les applications d'automatisation industrielle de petite taille, avec des besoins d'entrées/sorties limités. Leur taille compacte et leur conception simple en font la solution idéale pour les applications où l'espace est limité. Voici quelques avantages des automates compacts :

- La petite taille des automates compacts permet de gagner beaucoup de place dans les armoires de commande et les rend adaptés aux installations avec un espace limité.
- Ces automates programmables sont moins chers que leurs homologues plus performants. Leur rentabilité en fait une solution économique pour les projets nécessitant peu d'automatisation.

- Les automates compacts sont conviviaux et faciles à connecter aux systèmes actuels. Cette facilité de connectivité permet une transition en douceur vers des opérations automatisées avec peu de modifications.

Exemples :

- Siemens S7-1200.
- Allen-Bradley MicroLogix
- Schneider Modicon M221



Figure 39 - Schneider Modicon M221

5.6.2 PLC modulaire.

Les API modulaires sont conçus pour offrir une flexibilité aux applications d'automatisation industrielle. Ils permettent aux utilisateurs d'ajouter ou de supprimer facilement des modules d'entrée/sortie. Grâce à leur polyvalence, ils sont parfaitement adaptés aux applications dont les besoins d'automatisation évoluent. Voici quelques avantages des API modulaires :

- Il fournit une solution évolutive qui peut s'adapter à l'évolution des besoins d'automatisation.
- Il simplifie le dépannage et la maintenance, car les modules défectueux peuvent être remplacés sans affecter l'ensemble du système.
- Il garantit que le système d'automatisation peut évoluer pour répondre aux futures exigences technologiques ou opérationnelles.
- Les API modulaires sont également appelés API montés en rack. Le matériel de base commence par un matériel de montage en rack avec alimentation + unité CPU avec un nombre différent d'emplacements [3, 5, 10] disponibles sur le panneau arrière du rack pour l'extension de la sélection de divers modules API en fonction des besoins de l'application.
- Les règles de conception matérielle de base stipulent de fournir une capacité d'emplacements de réserve de 25 % pour une extension future, à la fois en termes de disponibilité du nombre d'emplacements et de disponibilité des points d'E/S sur les modules de chaque emplacement.
- La programmation devient complexe avec l'API modulaire et nécessite la maintenance d'un fichier de configuration matérielle réel pour chaque application qui comprend le processeur et les numéros de modèle de spécifications pour chaque module sur le rack arrière du processeur.
- Les temps de balayage des E/S de l'API augmentent à chaque ajout de modules d'E/S. L'optimisation du temps de balayage est donc un critère de conception important.
- La sélection de l'alimentation est essentielle et la distribution de l'alimentation s'effectue via un bus commun sur le panneau arrière vers les modules d'E/S installés sur chaque module de rack.

Exemples :

- Siemens S7-1200/1500
- Allen-Bradley ControlLogix
- Schneider Electric Modicon



Figure 40 - PLC Module ModelAS16AP11R-A.

5.7 Le langage ladder.

Le langage ladder ou langage à contacts ou encore schéma à relais fait partie des 5 langages standards de la norme CEI 61131-3 définit par la commission électrotechnique internationale(CEI).Le langage ladder est un langage de programmation graphique facile à comprendre et à prendre en main.C'est sans doute le langage de programmation d'automatisme le plus couramment utilisé pour la programmation d'automates.Le langage ladder est composé d'une séquence de contacts (interrupteurs qui sont soit fermés,soit ouverts) et de bobines qui permettent de traduire les états logiques d'un système.

Dans l'image ci-dessus, un appuie sur « contact » laisse passer le courant sur la ligne ce qui permet d'exciter la bobine.Il existe plusieurs types de contacts:

- | ← **Contact normalement ouvert**
- | → **Contact normalement fermé**
- | ↑ | ← **Contact agissant sur front montant**
- | ↓ | ← **Contact agissant sur front descendant**
- | < | ← **Contact comparatif infériorité**
- | > | ← **Contact comparatif supériorité**
- | ≤ | ← **Contact inférieur ou égal**
- | ≥ | ← **Contact supérieur ou égal**
- | = | ← **Contact égalité**
- | ≠ | ← **Contact différent de**

Figure 41 - programmation-ladder.

5.8 Réseaux d'automates

5.8.1 Principe:

Avec le développement des systèmes automatisés et de l'électronique, la recherche de la baisse des coûts et la nécessité actuelle de pouvoir gérer au mieux la production et à partir du moment où tous les équipements sont de type informatique, il devient intéressant de les interconnecter à un mini-ordinateur ou à un automate de supervision. L'interconnexion entre deux automates peut être réalisée très simplement en reliant une ou plusieurs sorties d'un automate à des entrées de l'autre et vice-versa. Cette méthode ne permet pas de transférer directement des variables internes d'un automate sur l'autre, de sorte que celles-ci doivent être converties par programme en variables de sortie avant leur transfert. Elle devient coûteuse en nombre d'entrées/sorties mobilisé pour cet usage et lourde du point de vue du câblage, lorsque le nombre de variables qui doivent être échangées devient important.

5.8.2 Bus de terrain

Pour diminuer les coûts de câblage des entrées / sorties des automates, sont apparus les bus de terrains. L'utilisation de blocs d'entrées / sorties déportés à permis tout d'abord de répondre à cette exigence.

Les interfaces d'entrées/sorties sont déportées au plus près des capteurs. Avec le développement technologique, les capteurs, détecteurs ... sont devenus intelligents et ont permis de se connecter directement à un bus.

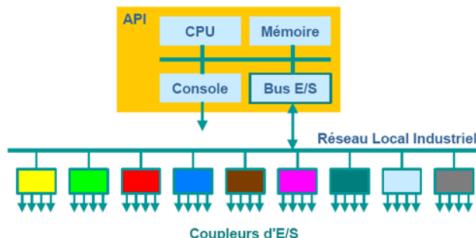


Figure 42 - Interconnexion par entrées/sorties déportées

Plusieurs protocoles de communication et des standards sont apparus pour assurer le « multiplexage » de toutes les informations en provenance des capteurs / préactionneurs. Par exemple le bus ASI (Actuators Sensors interface) est un bus de capteurs/actionneurs de type Maître / Esclave qui permet de raccorder 31 esclaves (capteurs ou préactionneurs) sur un câble spécifique (deux fils) transportant les données et la puissance. Ce bus est totalement standardisé et permet d'utiliser des technologies de plusieurs constructeurs.

- **Avantages des bus de terrain :**

- Réduction des coûts de câblage et possibilité de réutiliser le matériel existant
- Réduction des coûts de maintenance

- **Inconvénients des bus de terrain :**

- Taille du réseau limitée
- Latence dans les applications à temps critique
- Coût global

5.8.3 Différents types de réseaux d'automates :

5.8.3.1 Réseau en étoile :

Un centre de traitement commun échange avec chacune des autres stations. Deux stations ne peuvent pas échanger directement entre elles (Figure .6). Exemple le réseau de terrain BITBUS de la société INTEL.

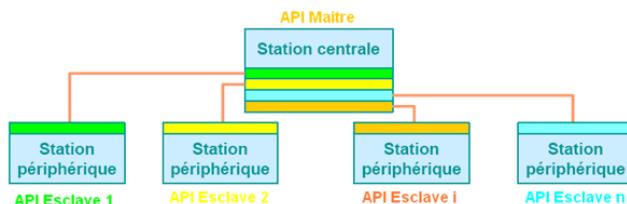


Figure 43 - Topologie étoile

- Avantages :**

- Grande vitesse d'échange.
- Différent types de supports de transmission.
- Pas de gestion d'accès au support.
- Inconvénients :
- **Inconvénients :**
- Coût global élevé.
- Evolutions limitées.
- Tout repose sur la station centrale.

5.8.3.2 Réseau en anneau :

Chaque station peut communiquer avec sa voisine. Cette solution est intéressante lorsqu'une station doit recevoir des informations de la station précédente ou en transmettre vers la suivante (Figure .7).

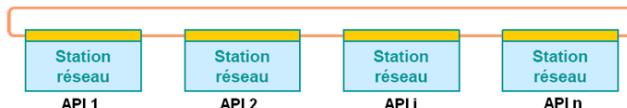


Figure 44 - Topologie Anneau

- Avantages :**

- Signal régénéré donc fiable.
- Contrôle facile des échanges (le message revient à l'émetteur).
- **Inconvénients :**

- Chaque station est bloquante.
- Une extension interrompe momentanément le réseau.

5.8.3.3 Réseau hiérarchisé :

C'est la forme de réseaux la plus performante. Elle offre une grande souplesse d'utilisation, les informations pouvant circuler entre-stations d'un même niveau ou circuler de la station la plus évoluée (en général un ordinateur) vers la plus simple, et réciproquement (Figure .8).

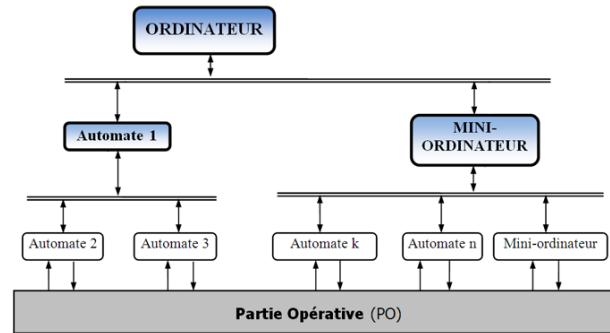


Figure 45 - Réseau hiérarchisé

5.8.4 Sécurité .

Les systèmes automatisés sont, par nature, source de nombreux dangers (tensions utilisées, déplacements mécaniques, jets de matière sous pression ...). Placé au coeur du système automatisé, l'automate se doit d'être un élément fiable car un dysfonctionnement de celui-ci pourrait avoir de graves répercussions sur la sécurité des personnes, de plus les coûts de réparation et un arrêt de la production peuvent avoir de lourdes conséquences sur le plan financier. Aussi, l'automate fait l'objet de nombreuses dispositions pour assurer la sécurité :

- **Contraintes extérieures** : l'automate est conçu pour supporter les différentes contraintes du monde industriel et à fait l'objet de nombreux tests normalisés.
- **Coupures d'alimentation** : l'automate est conçu pour supporter les coupures d'alimentation et permet, par programme, d'assurer un fonctionnement correct lors de la réalimentation (reprises à froid ou à chaud)
- **Mode RUN/STOP** : Seul un technicien peut mettre en marche ou arrêter un automate et la remise en marche se fait par une procédure d'initialisation (programmée)
- **Contrôles cycliques** :
 - Procédures d'autocontrôle des mémoires, de l'horloges, de la batterie, de la tensions d'alimentation et des entrées / sorties.
 - Vérification du temps de scrutation à chaque cycle appelée Watchdog (chien de garde), et enclenchement d'une procédure d'alarme en cas de dépassement de celui-ci (réglé par l'utilisateur).
- **Visualisation** : Les automates offrent un écran de visualisation où l'on peut voir l'évolution des entrées / sorties

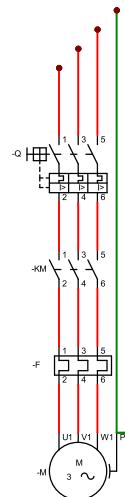
Les normes interdisent la gestion des arrêts d'urgence par l'automate ; celle-ci doit être réalisée en technologie câblée.

6 | implémentation

6.1 Projet 1 : Modélisation et simulation d'un système de pompage d'eau à l'aide d'un moteur asynchrone en commande en boucle ouverte

Dans cette section, nous présentons la modélisation et la simulation d'un système de pompage d'eau entraîné par un moteur asynchrone. Le moteur est commandé en boucle ouverte, c'est-à-dire que le système ne dispose pas de retour d'information pour ajuster la vitesse ou le couple du moteur. Ce type de commande est simple et convient aux applications où une grande précision n'est pas nécessaire. Les circuits de commande et de puissance sont modélisés à l'aide d'outils de simulation tels que Simulink et PC_Simu, ce qui permet d'observer et d'analyser le comportement du système dans différentes conditions de fonctionnement. L'objectif est de valider le fonctionnement de base du système de pompage et de comprendre la dynamique du moteur asynchrone en mode de commande ouverte.

- 1.1 Circuit de Puissance



Le circuit de puissance est responsable de la transmission de l'énergie électrique au moteur. Il comprend :

- **Contacteur (KM) :**

- Interrupteur commandé à distance qui permet d'allumer ou d'éteindre le moteur.
- Contacts de puissance (U, V, W) pour supporter les courants élevés nécessaires au fonctionnement du moteur.
- Contacts auxiliaires pour maintenir l'alimentation après démarrage.

- **Relais thermique :**

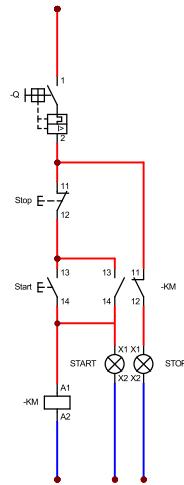
- Placé en série avec le moteur pour protéger l'installation contre les surcharges de courant.
- Coupe l'alimentation en cas de dépassement du courant nominal, évitant toute détérioration du moteur.

- **Moteur synchrone triphasé (M) :**

- Reçoit l'alimentation depuis les bornes du contacteur (U1, V1, W1).
- Entraîne la pompe à eau pour pomper l'eau en continu.

• 1.2 Circuit de Commande

Le circuit de commande est responsable de contrôler la mise en marche et l'arrêt du moteur en agissant sur la bobine du contacteur. Il comprend :



► **Bouton poussoir Start (NO - Normalement Ouvert) :**

- Alimente temporairement la bobine du contacteur lorsque pressé.
- Une fois la bobine excitée, elle ferme les contacts de puissance, allumant le moteur.

► **Bouton poussoir Stop (NF - Normalement Fermé) :**

- Permet le passage du courant à la bobine en position normale.
- Coupe l'alimentation de la bobine lorsque pressé, désactivant le contacteur et arrêtant le moteur.

► **Contact auxiliaire du contacteur (KM) :**

- Câblé en parallèle du bouton Start pour assurer le maintien du circuit après relâchement du bouton Start.
- Maintient l'alimentation de la bobine, permettant au moteur de continuer à fonctionner tant qu'il n'est pas arrêté explicitement.

► **Bobine du contacteur :**

- Reçoit l'alimentation à travers le circuit de commande.
- Une fois excitée, elle ferme les contacts de puissance, permettant l'alimentation du moteur.

• 2. Fonctionnement du Système

• 2.1 Démarrage du Moteur

- Lorsque le bouton Start est appuyé :
 - La bobine du contacteur est alimentée.
 - Les contacts de puissance du contacteur se ferment, allumant le moteur.
 - Le contact auxiliaire s'active et maintient l'alimentation de la bobine, permettant au moteur de continuer à fonctionner même après relâchement du bouton Start.

• 2.2 Arrêt du Moteur

- Pour arrêter le moteur :
 - Appuyez sur le bouton Stop.

- Le bouton Stop coupe l'alimentation de la bobine, désactivant le contacteur et arrêtant le moteur.

- **2.3 Protection du Système**

- Le relais thermique surveille le courant du moteur.
- En cas de surcharge, le relais thermique coupe automatiquement l'alimentation pour éviter toute détérioration du moteur.

- **3. Caractéristiques du Système**

- **Boucle Ouverte :**

- Le système ne surveille ni n'ajuste automatiquement son état (par exemple, le niveau d'eau dans le réservoir).
- La commande repose entièrement sur des actions manuelles via les boutons Start/Stop.

- **Simplicité et Robustesse :**

- Conception simple et économique, adaptée aux applications où une surveillance automatique n'est pas requise.
- Les protections intégrées (relais thermique) garantissent la sécurité du système contre les surcharges.

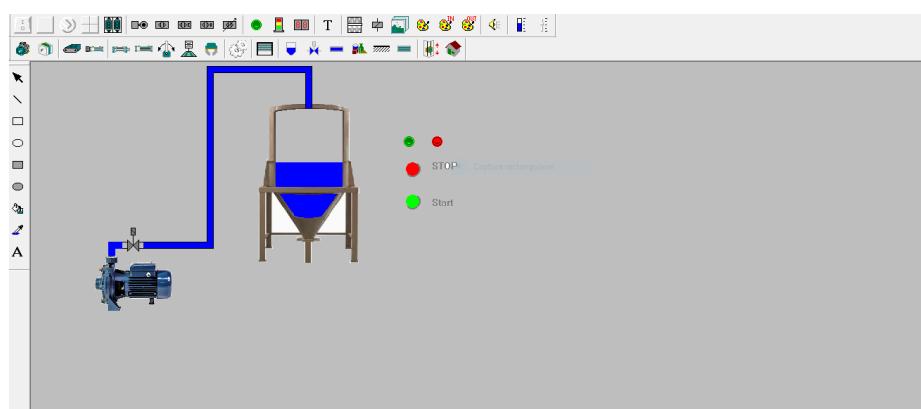
- **4. Outils de Simulation et Modélisation**

Pour analyser et valider le fonctionnement du système, plusieurs outils ont été utilisés :

- **4.1 Cade_Simu**

- Permet de concevoir et simuler le schéma électrique complet du système.
- Facilite la création et la validation du circuit de puissance et de commande.

- **4.2 PC_Simu**

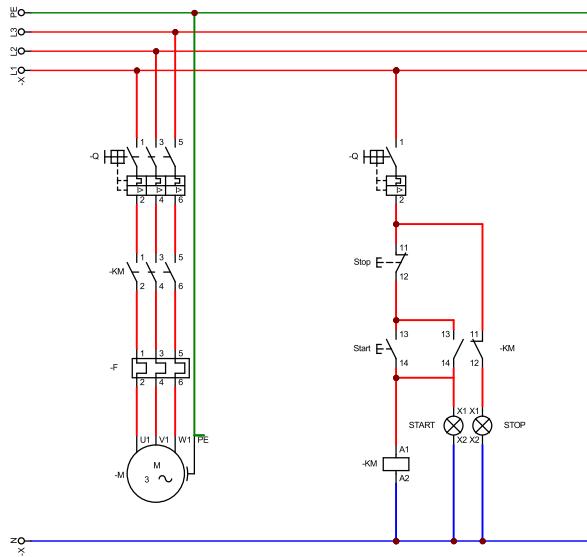


- Fournit une interface homme-machine (IHM) avec des boutons virtuels pour tester le système.
- Simule l'interaction humaine avec le système, permettant de vérifier la logique de fonctionnement.

- **4.3 MATLAB Simulink**

- Modélise le comportement dynamique du moteur synchrone triphasé.
- Utilise les transformations de Clarke et Park pour simplifier l'analyse des signaux électriques et mieux comprendre la réponse du moteur.

- **5. Schéma Synthétique** Voici un schéma synthétique résumant les deux circuits principaux :



- Le **relais thermique** protège le moteur en cas de surcharge.
- Le **contacteur** est commandé par la **bobine**, alimentée par le **circuit de commande**.
- Le **moteur** est alimenté par les contacts de puissance du contacteur.

• Modélisation Simulink d'une Machine à Induction

Ce projet vise à développer un modèle dynamique de machine à induction pour une simulation dans Simulink. Le modèle repose sur des équations fondamentales qui décrivent le comportement électrique et mécanique de la machine. Voici une présentation structurée du projet, en incluant les circuits équivalents per phase et les principaux aspects de la modélisation.

• 1. Contexte et Objectifs

Le but principal de ce projet est de créer un modèle Simulink capable de simuler le comportement dynamique d'une machine à induction triphasée. Ce modèle permettra d'analyser divers scénarios opérationnels, tels que le démarrage, le régime permanent et les variations de charge. La transformation de Clarke-Park est utilisée pour simplifier l'analyse en convertissant les grandeurs triphasées en un système biphasé tournant (axes d-q), facilitant ainsi la conception et la mise en œuvre des stratégies de contrôle.

• 2. Circuits Équivalents Per Phase

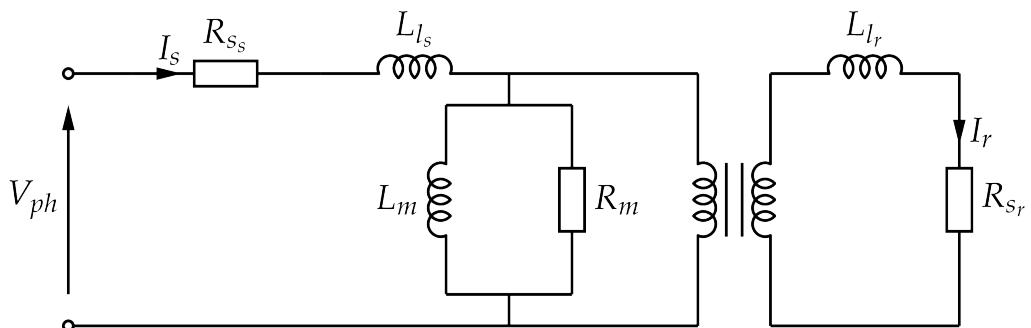


Figure 50 - circuit équivalent par phase

Le **circuit équivalent par phase** d'une machine à induction est une représentation simplifiée des caractéristiques électriques de la machine. C'est un outil fondamental pour comprendre le comportement de la machine.

- Le circuit est constitué de :
 - R_s : Résistance du stator
 - R_r : Résistance du rotor rapportée au côté stator
 - X_{ls} : Réactance de fuite du stator
 - X_{lr} : Réactance de fuite du rotor rapportée au côté stator
 - X_m : Réactance magnétisante

Ce circuit représente une phase de la machine à induction triphasée et aide à calculer des quantités telles que le courant statorique, le courant rotorique, le facteur de puissance et le couple. Cependant, il est important de noter que ce circuit est une représentation en régime permanent et ne capture pas le comportement dynamique complet de la machine.

- **4.4 La Transformation de Clarke-Park**

La **transformation de Clarke-Park** est une transformation mathématique utilisée pour effectuer la décomposition selon les axes d-q. Elle comporte deux étapes principales :

- **4.4.1 Transformation de Clarke (Transformation $\alpha\beta$)**

Cette étape transforme les courants statoriques triphasés (i_a, i_b, i_c) en courants diphasés (i_α, i_β) dans un système de référence stationnaire. Les équations de cette transformation sont :

$$\begin{aligned} i_\alpha &= \frac{2}{3}i_a - \frac{1}{3}i_b - \frac{1}{3}i_c \\ i_\beta &= \frac{1}{\sqrt{3}}i_b - \frac{1}{\sqrt{3}}i_c \end{aligned} \tag{1}$$

- **4.4.2 Transformation de Park (Transformation dq)**

Cette étape transforme ensuite les courants diphasés (i_α, i_β) du système de référence stationnaire vers un système de référence tournant aligné avec le flux rotorique. Ce système de référence tournant est appelé le **système d-q**. Les équations de cette transformation sont :

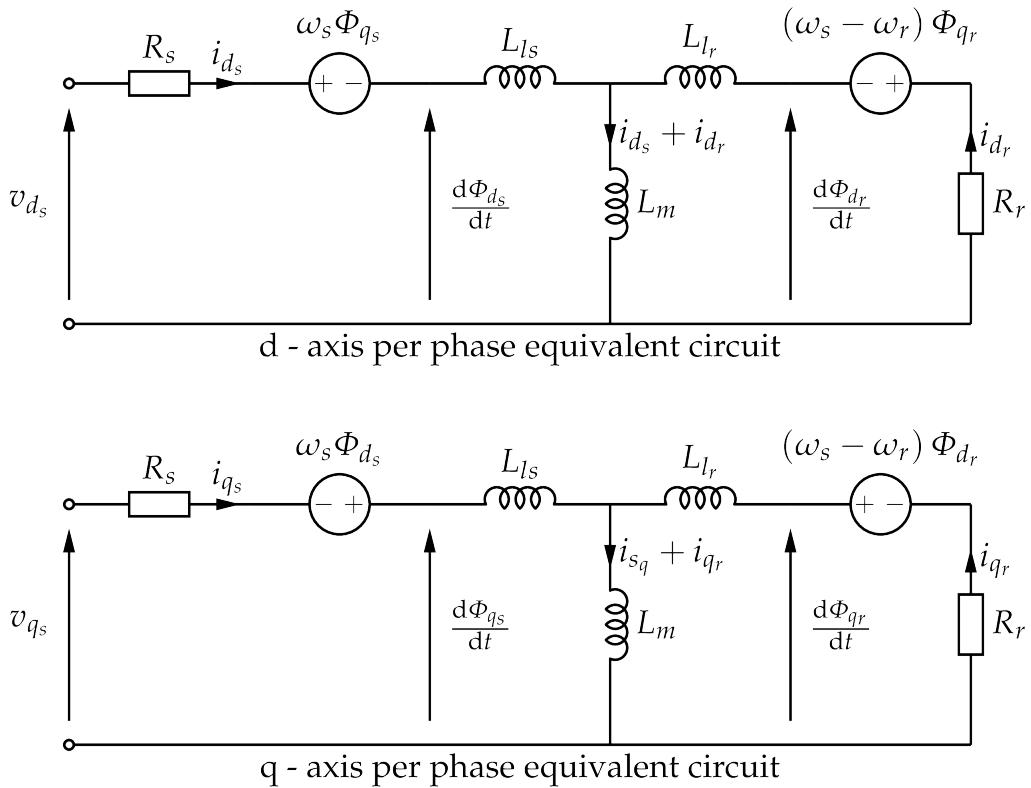
$$\begin{aligned} i_d &= i_\alpha \cos(\theta) + i_\beta \sin(\theta) \\ i_q &= -i_\alpha \sin(\theta) + i_\beta \cos(\theta) \end{aligned} \tag{2}$$

où θ est l'angle entre le système de référence stationnaire et le système de référence tournant.

La **transformation de Clarke-Park** est cruciale car elle facilite la décomposition selon les axes d-q, convertissant les quantités alternatives variables dans le temps en quantités continues dans le système de référence tournant. Cela simplifie la conception du système de contrôle, ce qui facilite la mise en œuvre de stratégies de contrôle.

- **Décomposition selon les Axes d-q**

La décomposition selon les axes d-q est une technique utilisée pour transformer les variables triphasées (tensions, courants et flux) d'une machine à courant alternatif en un système orthogonal biphasé tournant à la vitesse synchrone. Cette transformation simplifie l'analyse et le contrôle de la machine.



• 2.1 Circuit Équivalent du Axe d

Le circuit équivalent du axe d représente les composantes liées à la production de flux. Les principales caractéristiques sont :

- **Résistance du stator (R_s)** : Représente la résistance des bobinages du stator.
- **Réactance de fuite du stator (L_{ls})** : Correspond aux pertes de flux qui ne couplent pas efficacement avec le rotor.
- **Inductance mutuelle (L_m)** : Représente le couplage magnétique entre le stator et le rotor.
- **Résistance du rotor (R_r)** : Représente la résistance des bobinages ou barres du rotor.
- **Réactance de fuite du rotor (L_{lr})** : Correspond aux pertes de flux dues au rotor.
- **Vitesse synchrone (ω_s)** : Vitesse théorique de rotation du champ statorique.
- **Fréquence de glissement ($\omega_s - \omega_r$)** : Différence entre la vitesse synchrone et la vitesse réelle du rotor.

▸ Équation de Boucle du Axe d

L'équation de boucle du axe d est donnée par :

$$v_{ds} - i_{ds}R_s + \omega_s \Phi_{qs} - L_{ls} \frac{di_{ds}}{dt} - L_m \frac{d(i_{ds} + i_{dr})}{dt} = 0 \quad (3)$$

En simplifiant en termes de flux :

$$v_{ds} - i_{ds}R_s + \omega_s \Phi_{qs} - \frac{d\Phi_{ds}}{dt} = 0 \quad (4)$$

Isoler la dérivée du flux :

$$\frac{d\Phi_{ds}}{dt} = v_{ds} - i_{ds}R_s - \omega_s\Phi_{qs} \quad (5)$$

- **2.2 Circuit Équivalent du Axe q**

Le circuit équivalent du axe q représente les composantes liées à la production de couple. Les principales caractéristiques sont similaires à celles du circuit du axe d, mais orientées vers la production de couple.

- **Équation de Boucle du Axe q**

L'équation de boucle du axe q est donnée par :

$$v_{qs} - i_{qs}R_s - L_{ls}\frac{di_{qs}}{dt} - L_m\frac{d(i_{qs} + i_{qr})}{dt} + \omega_s\Phi_{ds} = 0 \quad (6)$$

En simplifiant en termes de flux :

$$\frac{d\Phi_{qs}}{dt} = v_{qs} - i_{qs}R_s + \omega_s\Phi_{ds} \quad (7)$$

- **2.3 Relations entre Flux et Courants**

Les relations entre les flux et les courants sont données par :

- **Flux du axe q du stator :**

$$\Phi_{qs} = (i_{qs} + i_{qr})L_m + i_{qs}L_{ls} \quad (8)$$

- **Flux du axe d du stator :**

$$\Phi_{sd} = (i_{ds} + i_{dr})L_m + i_{ds}L_{ls} \quad (9)$$

- **Flux du axe q du rotor :**

$$\Phi_{rq} = (i_{qs} + i_{qr})L_m + i_{qr}L_{lr} \quad (10)$$

- **Flux du axe d du rotor :**

$$\Phi_{rd} = (i_{ds} + i_{dr})L_m + i_{dr}L_{lr} \quad (11)$$

- **2.4 Courants du Stator et du Rotor**

À partir des expressions de flux, on peut dériver les courants :

- **Courant du axe q du stator :**

$$i_{qs} = \frac{\Phi_{qs} - L_m i_{qr}}{L_m + L_{ls}} \quad (12)$$

- **Courant du axe d du stator :**

$$i_{ds} = \frac{\Phi_{sd} - L_m i_{dr}}{L_m + L_{ls}} \quad (13)$$

- **Courant du axe q du rotor :**

$$i_{qr} = \frac{\Phi_{rq} - L_m i_{qs}}{L_m + L_{tr}} \quad (14)$$

- Courant du axe d du rotor :**

$$i_{dr} = \frac{\Phi_{rd} - L_m i_{ds}}{L_m + L_{tr}} \quad (15)$$

- 3. Torque Électromécanique**

Le torque électromécanique peut être exprimé en fonction des courants du stator et du rotor :

$$T_e = \frac{3P}{2}(i_{qs}(i_{ds} + i_{dr})L_m + i_{ds}(i_{qs} + i_{qr})L_m) \quad (16)$$

- 4. Évolution de la Vitesse et de la Position du Rotor**

La variation de la vitesse du rotor est donnée par :

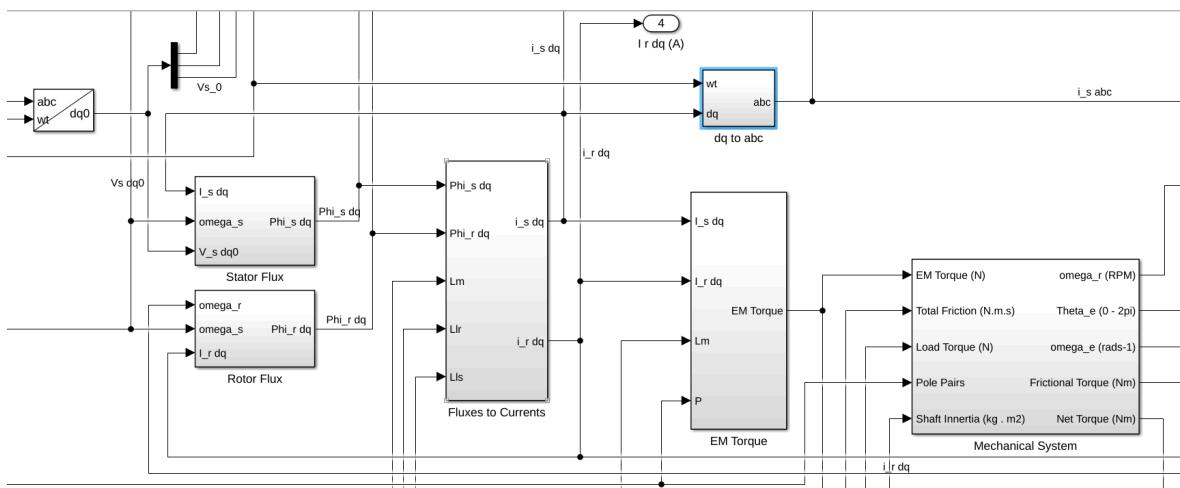
$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{T_e - D\omega_r - T_L}{J} \quad (17)$$

où :

- ω_r : Vitesse angulaire du rotor en $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$
- T_e : Torque électromécanique en Nm
- D : Frottement total en $\frac{\text{Nm}}{\frac{\text{rad}}{\text{s}}}$
- T_L : Couple de charge en Nm
- J : Inertie mécanique totale en kg m^2

- Implémentation dans Simulink : Simulation de la Machine à Induction**

La simulation de la machine à induction dans Simulink est réalisée en utilisant un modèle dynamique basé sur les équations d'état et les transformations de Clarke-Park. Le schéma ci-dessous illustre l'implémentation du modèle dans Simulink, avec une structure modulaire qui permet de représenter les interactions entre le stator, le rotor et le système mécanique.



- 1. Structure Générale du Modèle**

Le modèle Simulink est divisé en plusieurs sections principales :

1. Entrée des Signaux :

- Les signaux d'entrée comprennent les tensions triphasées ($V_{s\ abc}$) et la vitesse synchrone (ω_t).
- Ces signaux sont convertis en référentiel d-q (dq0) via une transformation abc → dq0.

2. Calcul des Flux et Courants :

- Les flux statoriques ($\Phi_{s\ dq}$) et rotoriques ($\Phi_{r\ dq}$) sont calculés à partir des courants statoriques ($i_{s\ dq}$) et rotoriques ($i_{r\ dq}$) ainsi que des paramètres de la machine (inductances mutuelles L_m , réactances de fuite L_{ls} et L_{lr}).
- Les courants sont ensuite dérivés à partir des flux en utilisant les relations entre flux et courants.

3. Calcul du Couple Électromagnétique :

- Le couple électromagnétique (T_e) est calculé à partir des courants statoriques et rotoriques dans le référentiel d-q.
- Cette étape utilise les inductances mutuelles pour lier les courants aux couples.

4. Système Mécanique :

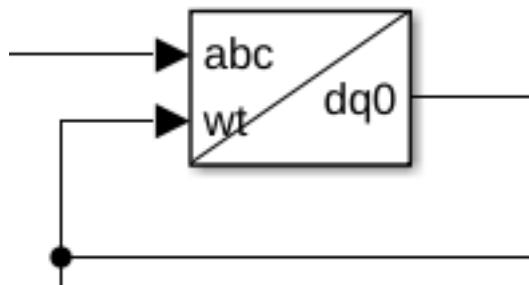
- Le couple électromagnétique est transmis au système mécanique, qui inclut l'inertie du rotor (J), la friction (D) et le couple de charge (T_L).
- La vitesse du rotor (ω_r) et la position du rotor (θ_r) sont calculées en intégrant les équations mécaniques.

5. Transformation des Sorties :

- Les courants statoriques et rotoriques en référentiel d-q peuvent être transformés en référentiel abc si nécessaire, pour une analyse triphasée.

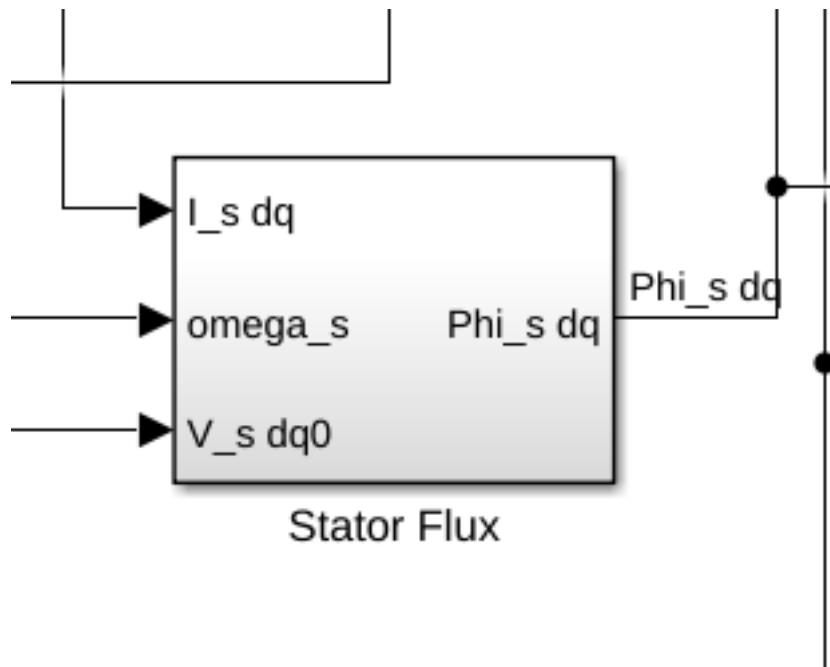
• 2. Description Détalée des Blocs

• 2.1 Entrée des Signaux



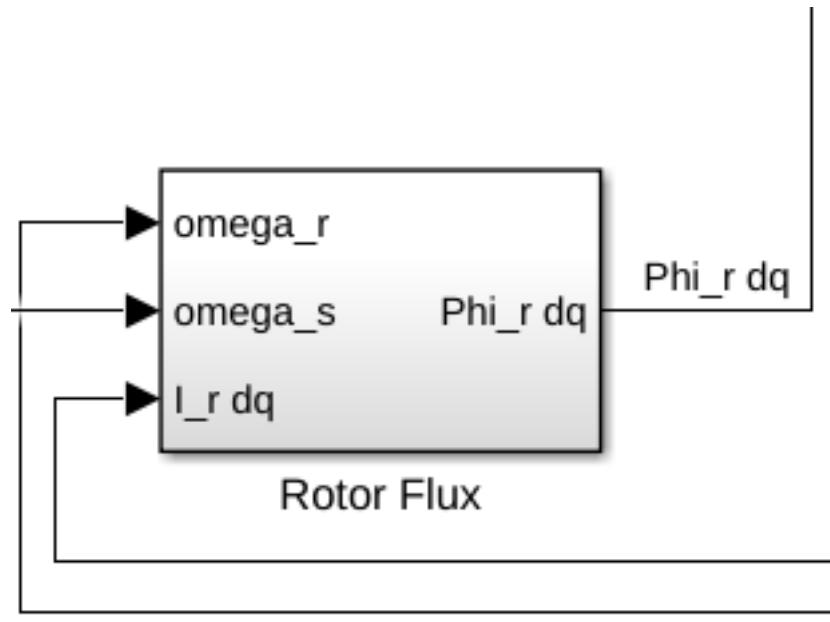
- **abc → dq0** : Ce bloc convertit les tensions triphasées ($V_{s\ abc}$) et la vitesse synchrone (ω_t) en référentiel d-q (dq0). Cette transformation est essentielle pour simplifier l'analyse dynamique de la machine.

• 2.2 Calcul des Flux Statoriques



- **Stator Flux** : Ce bloc calcule les flux statoriques ($\Phi_{s \text{ dq}}$) à partir des courants statoriques ($i_{s \text{ dq}}$) et des paramètres de la machine (inductances mutuelles L_m et réactance de fuite statorique L_{ls}).

• 2.3 Calcul des Flux Rotoriques

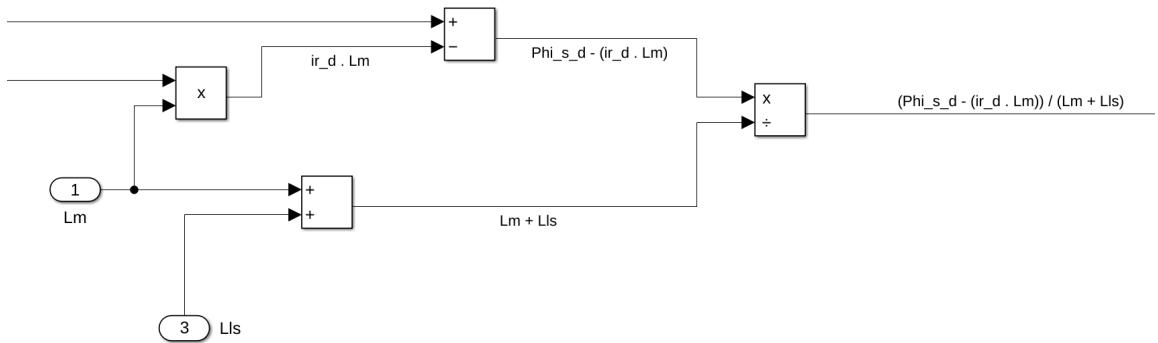


- **Rotor Flux** : Ce bloc calcule les flux rotoriques ($\Phi_{r \text{ dq}}$) à partir des courants rotoriques ($i_{r \text{ dq}}$) et des paramètres de la machine (inductances mutuelles L_m et réactance de fuite rotorique L_{lr}).

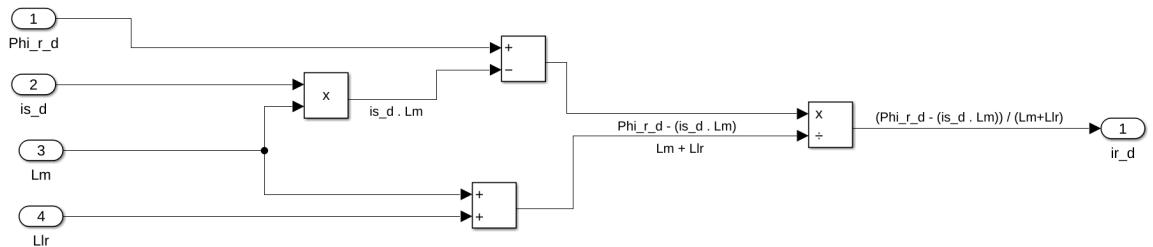
• 2.4 Conversion Flux → Courants

- **Fluxes à Courants** : Ce bloc convertit les flux statoriques et rotoriques en courants statoriques et rotoriques en utilisant les relations entre flux et courants :

$$i_{s_dq} = \frac{\Phi_{s_dq} - L_m i_{r_dq}}{L_m + L_{ls}} \quad (18)$$



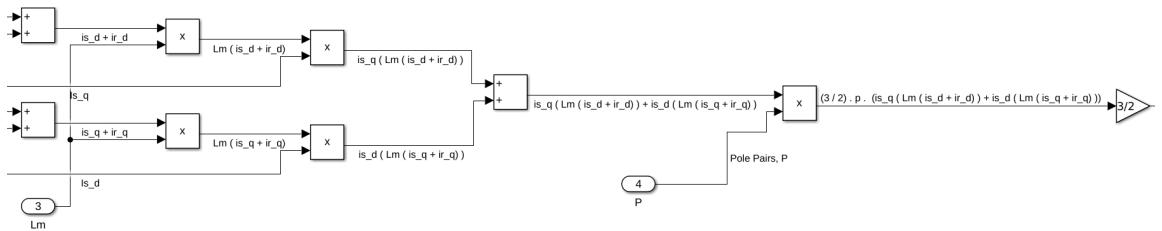
$$i_{r_dq} = \frac{\Phi_{r_dq} - L_m i_{s_dq}}{L_m + L_{lr}} \quad (19)$$



• 2.5 Calcul du Couple Électromagnétique

- EM Torque :** Ce bloc calcule le couple électromagnétique (T_e) à partir des courants statoriques et rotoriques dans le référentiel d-q :

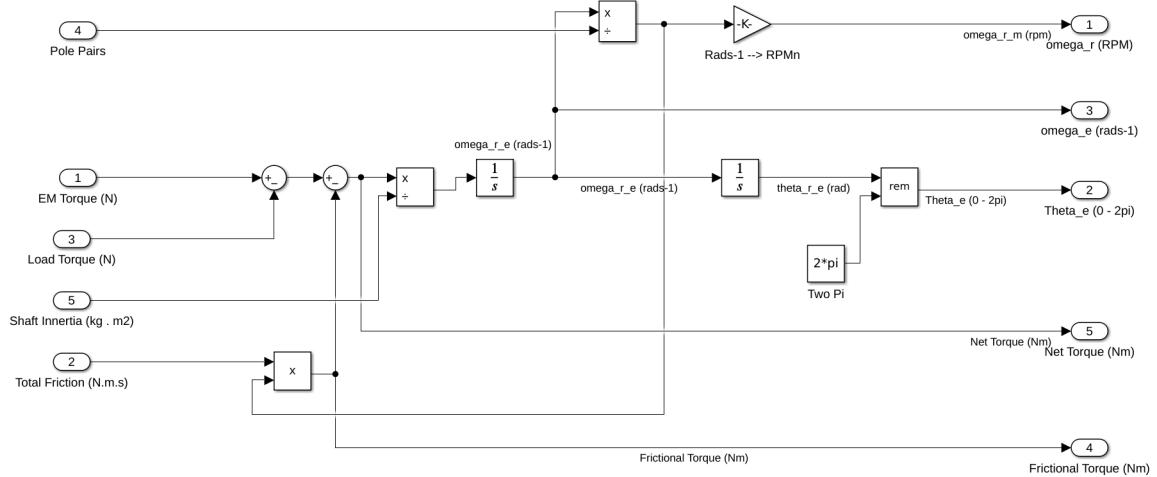
$$T_e = \frac{3P}{2} (i_{qs}(i_{ds} + i_{dr})L_m + i_{ds}(i_{qs} + i_{qr})L_m) \quad (20)$$



• 2.6 Système Mécanique

- **Mechanical System :** Ce bloc simule le comportement mécanique du rotor, en tenant compte de l'inertie (J), de la friction (D) et du couple de charge (T_L). La vitesse du rotor (ω_r) est calculée en résolvant l'équation :

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{T_e - D\omega_r - T_L}{J} \quad (21)$$

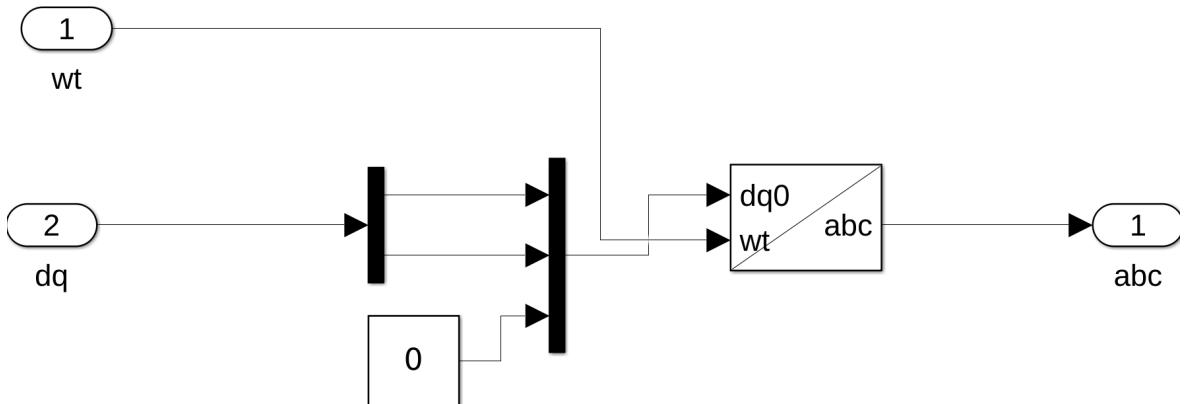


La position du rotor (θ_r) est obtenue par intégration de la vitesse :

$$\theta_r = \int \omega_r \, dt \quad (22)$$

• 2.7 Transformation des Sorties

- **dq → abc :** Si nécessaire, les courants statoriques et rotoriques en référentiel d-q peuvent être transformés en référentiel abc pour une analyse triphasée.



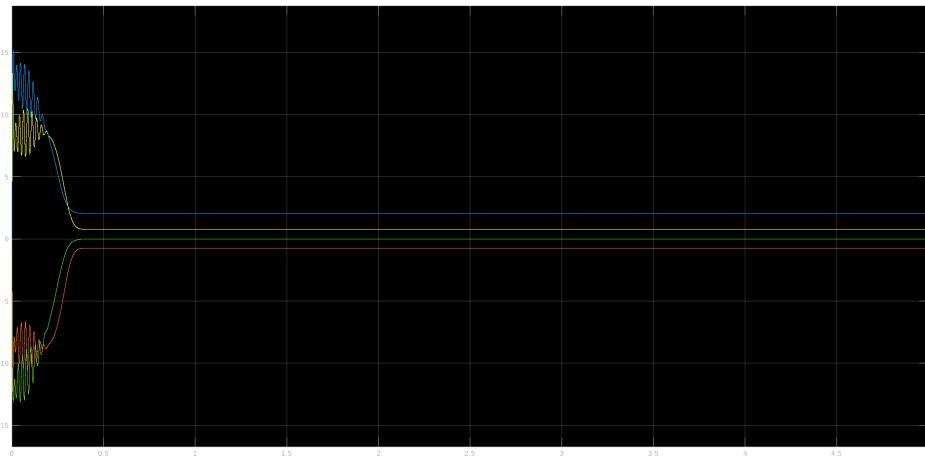
• 3. Connexions et Signaux Principaux

► Entrées :

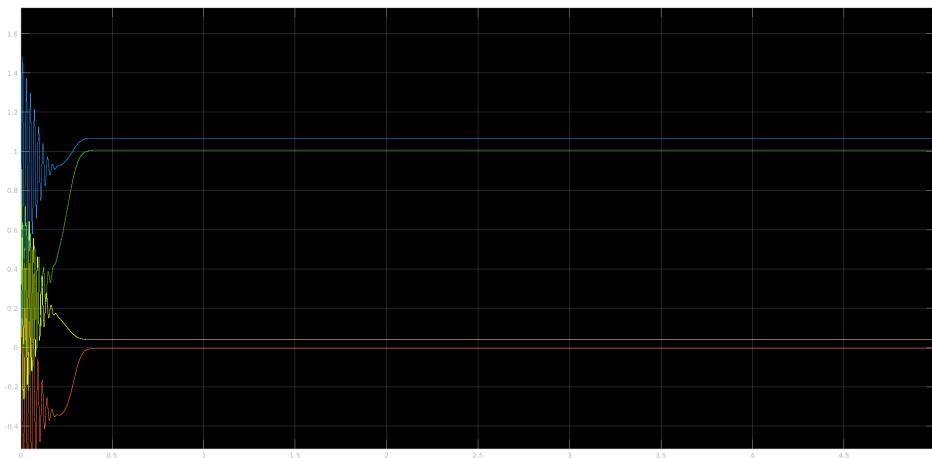
- Tensions triphasées ($V_{s\ abc}$)
- Vitesse synchrone (ω_t)

- **Sorties :**

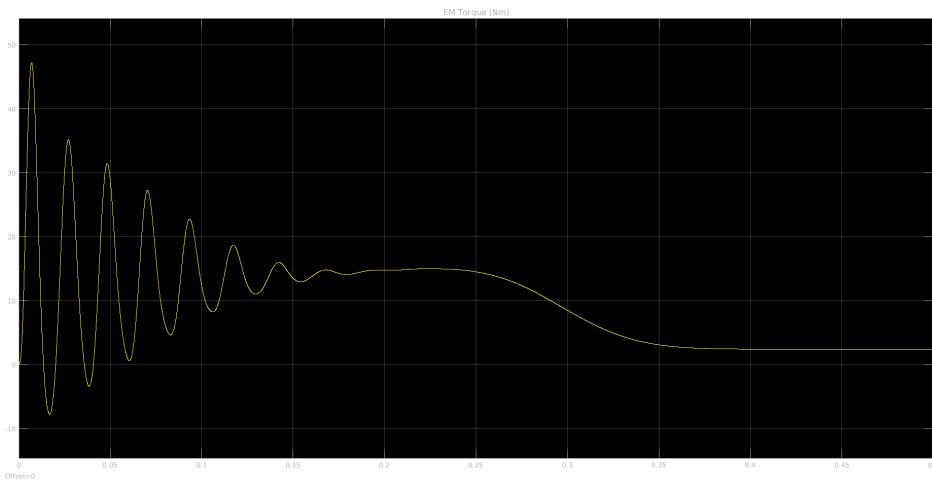
- Courants statoriques et rotoriques ($i_{s\text{ dq}}$, $i_{r\text{ dq}}$)



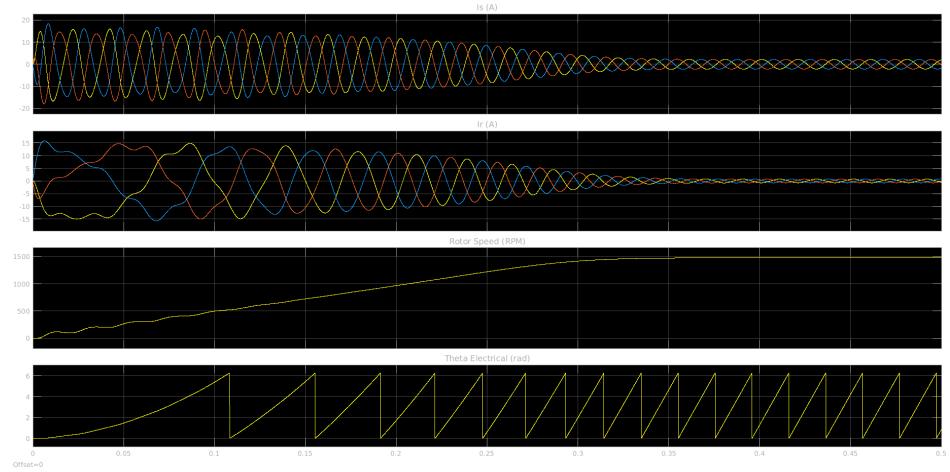
- Flux statoriques et rotoriques ($\Phi_{s\text{ dq}}$, $\Phi_{r\text{ dq}}$)



- Couple électromagnétique (T_e)



- Vitesse et position du rotor (ω_r , θ_r)



6.2 projet 2 : d'un Entraînement Électrique par Variateur de Fréquence (VFD).

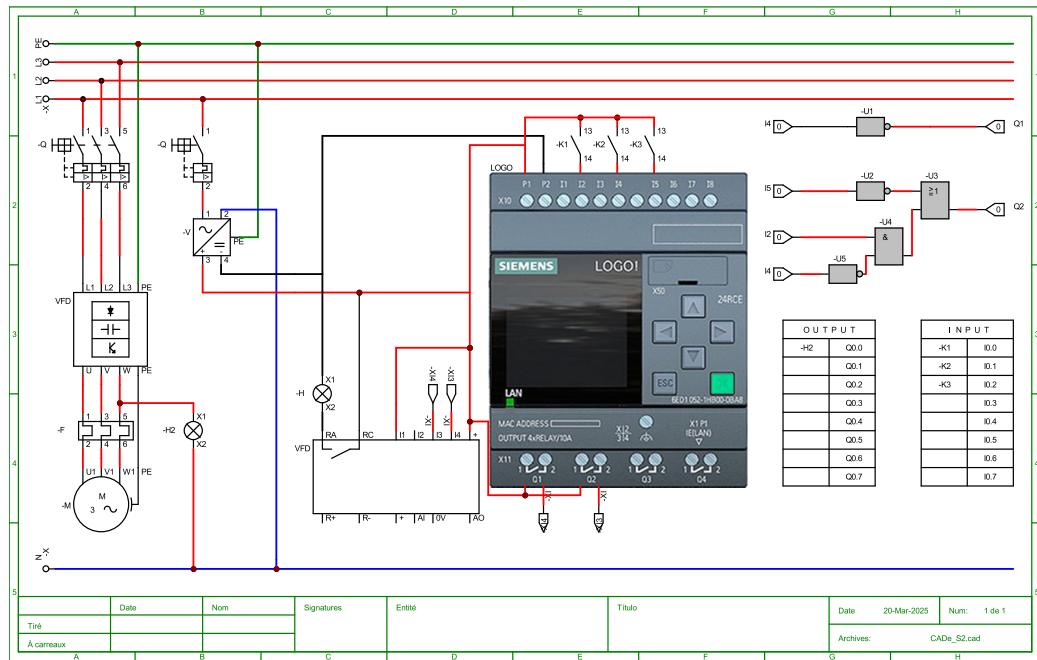
Ce projet vise à concevoir et simuler un système d'entraînement électrique à vitesse variable reposant sur un variateur de fréquence (VFD – Variable Frequency Drive) pour piloter une machine asynchrone triphasée. Les moteurs asynchrones, largement utilisés dans les applications industrielles pour leur fiabilité et leur rentabilité, présentent des défis de contrôle dynamique liés à la régulation précise de leur vitesse et de leur couple. Dans un contexte industriel marqué par des exigences croissantes en efficacité énergétique et en flexibilité opérationnelle, ce travail se concentre sur la modélisation et la simulation numérique de l'interaction entre un VFD et un moteur asynchrone. L'objectif est de valider, par des outils de simulation (Matlab/Simulink, cade simu, ou équivalents), les performances du système sous divers scénarios de fonctionnement : régimes transitoires, variations de charge, ou profils de vitesse complexes. Cette approche permet d'anticiper les comportements réels du moteur, d'optimiser les paramètres du VFD, et de garantir un compromis entre stabilité, précision et consommation énergétique.

- **1. Aperçu du Système**

Le système de pompage d'eau décrit dans ce chapitre utilise un Automate Programmable Industriel (API) pour automatiser et contrôler le transfert d'eau. L'objectif principal de ce système est de gérer le débit d'eau de manière efficace et fiable, potentiellement pour la distribution, le stockage ou des processus industriels.

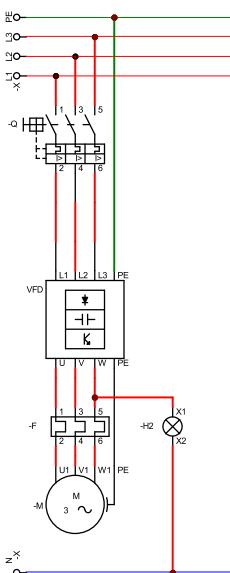
- Les composants principaux du système comprennent :
 - Une alimentation électrique triphasée (L1, L2, L3, PE) qui fournit l'énergie électrique nécessaire au fonctionnement du système.
 - Un moteur électrique triphasé (M) qui sert de moteur principal pour la pompe à eau.
 - Un variateur de fréquence (VFD) qui contrôle la vitesse de rotation du moteur, permettant un ajustement précis du débit d'eau.
 - Un API SIEMENS LOGO! qui fonctionne comme le contrôleur intelligent, exécutant la logique de commande et gérant le fonctionnement du système.
 - Des dispositifs d'entrée qui fournissent des signaux à l'API, représentant l'état du système ou les commandes de l'opérateur. Dans ce système, les entrées -K1 (I0.0), -K2 (I0.1) et -K3 (I0.2) sont interprétées comme des capteurs de niveau dans le réservoir d'eau.
 - -K1 représente un capteur de « niveau bas ».
 - -K2 représente un capteur de « niveau moyen ».
 - -K3 représente un capteur de « niveau haut ».
 - Des dispositifs de sortie qui sont contrôlés par l'API pour actionner d'autres composants ou fournir des indications. -H2 (Q0.0) est une de ces sorties.
 - Des relais et des contacteurs (K1, K2, K3, Q1, Q2) qui servent de dispositifs de commutation pour contrôler les circuits électriques.
- L'état du réservoir est déterminé par la combinaison des capteurs de niveau :
 - **000 (-K1/-K2/-K3 = 0/0/0)** : Le réservoir est à un niveau très bas, en dessous du point de détection du capteur de « niveau bas » (-K1).
 - **001 (-K1/-K2/-K3 = 1/0/0)** : Le niveau d'eau a dépassé le capteur de « niveau bas » (-K1) mais est toujours en dessous du capteur de « niveau moyen » (-K2).
 - **011 (-K1/-K2/-K3 = 1/1/0)** : Le niveau d'eau a dépassé à la fois le capteur de « niveau bas » (-K1) et le capteur de « niveau moyen » (-K2) mais est toujours en dessous du capteur de « niveau haut » (-K3).

- 111 (-K1/-K2/-K3 = 1/1/1) : Le niveau d'eau a atteint le capteur de « niveau haut » (-K3), indiquant que le réservoir est plein (ou à un niveau élevé).



L'API surveille en permanence les signaux d'entrée des capteurs de niveau, exécute la logique de commande programmée et génère des signaux de sortie pour contrôler le VFD et d'autres actionneurs. Cette stratégie de commande en boucle fermée garantit que le système de pompage d'eau fonctionne efficacement, réagit aux demandes changeantes et maintient les performances souhaitées.

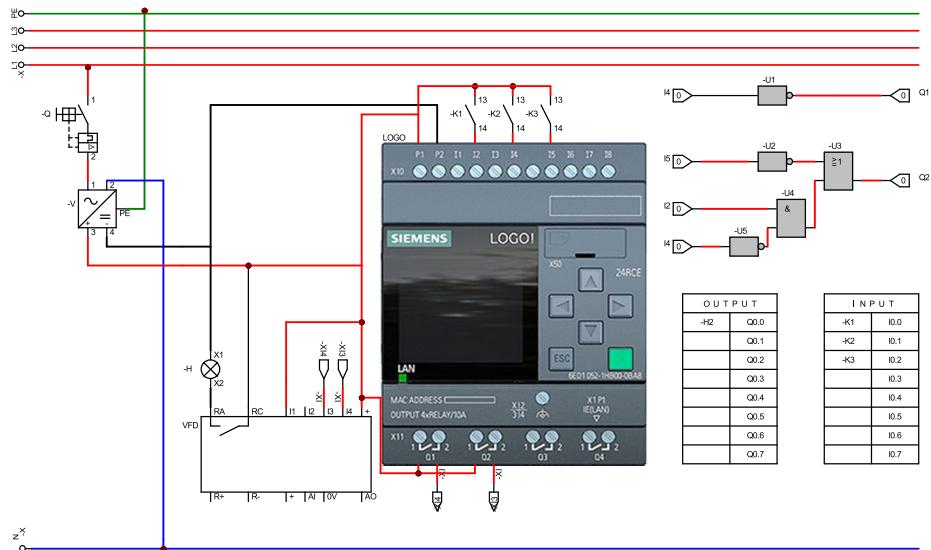
• 2. Circuit de Puissance



Le système de distribution de l'alimentation électrique fournit l'énergie nécessaire au fonctionnement du système de pompage d'eau. La source d'alimentation principale est un courant alternatif (CA) triphasé, comme indiqué par les bornes étiquetées L1, L2 et L3. Ces bornes représentent les conducteurs triphasés qui transportent l'énergie électrique vers le système. Un conducteur de terre de protection (PE) est également présent, servant de mise à la terre de sécurité pour protéger le personnel et l'équipement contre les défauts électriques.

L'alimentation triphasée est fournie au variateur de fréquence (VFD). Le VFD est un dispositif électronique qui contrôle la fréquence et la tension fournies au moteur, régulant ainsi sa vitesse. Le VFD reçoit l'alimentation CA entrante via les bornes L1, L2, L3 et PE.

• 4. Circuit de Commande



Le circuit de commande de ce système de pompage d'eau est orchestré par un Automate Programmable Industriel (API) SIEMENS LOGO!. L'API agit comme le cerveau du système, prenant des décisions et contrôlant le fonctionnement des autres composants.

► 4.1. API SIEMENS LOGO!

L'API SIEMENS LOGO! est un contrôleur compact et polyvalent conçu pour les tâches d'automatisation. Il est alimenté par une alimentation électrique connectée aux bornes P1 et P2. L'API possède plusieurs canaux d'entrée et de sortie qui lui permettent d'interagir avec le monde extérieur.

► 4.2. Entrées (Inputs)

L'API reçoit des signaux des dispositifs d'entrée qui fournissent des informations sur l'état du système. les entrées suivantes sont définies :

- K1 est connecté à l'entrée I2.
- K2 est connecté à l'entrée I4.
- K3 est connecté à l'entrée I5.

Comme discuté précédemment, -K1, -K2 et -K3 sont des capteurs de niveau dans le réservoir d'eau.

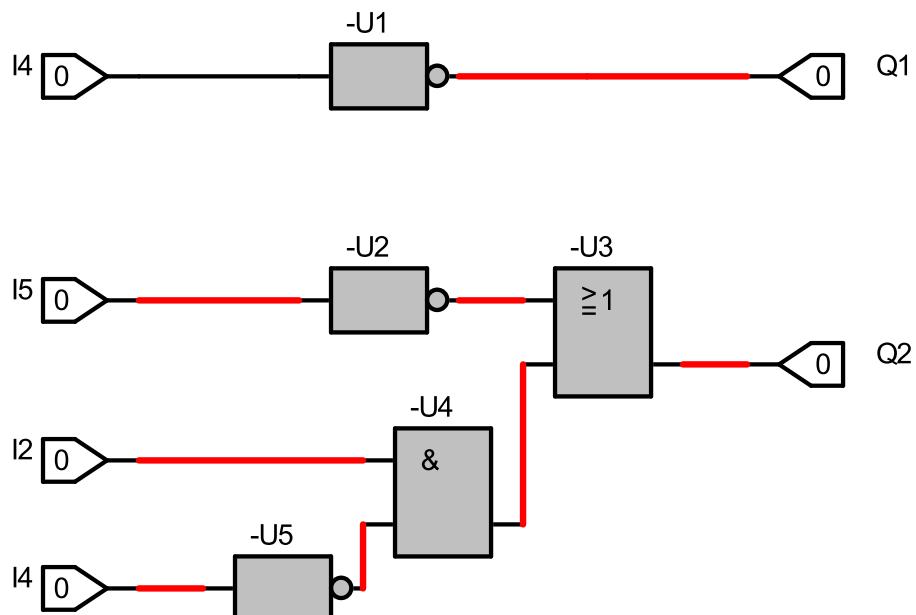
► 4.3. Sorties (Outputs)

L'API envoie des signaux aux dispositifs de sortie pour contrôler les actionneurs ou fournir des indications. la sortie suivante est définie :

- Q1 est connecté à l'entrée I3 de VFD.
- Q2 est connecté à l'entrée I4 de VFD.

► 4.4. Logique de Commande (Control Logic)

- Le comportement de l'API est déterminé par la logique de commande qui y est programmée.
- Le schéma comprend un diagramme logique sur le côté droit, qui illustre les relations entre les entrées et les sorties.
- Ce diagramme logique définit comment l'API réagira aux différentes combinaisons de signaux d'entrée (c'est-à-dire les états des capteurs de niveau) pour contrôler les sorties et, par conséquent, le fonctionnement du système de pompage.



Le circuit de commande constitue donc l'intelligence du système de pompage d'eau, interprétant les informations des capteurs et dictant les actions appropriées pour réaliser la commande souhaitée.

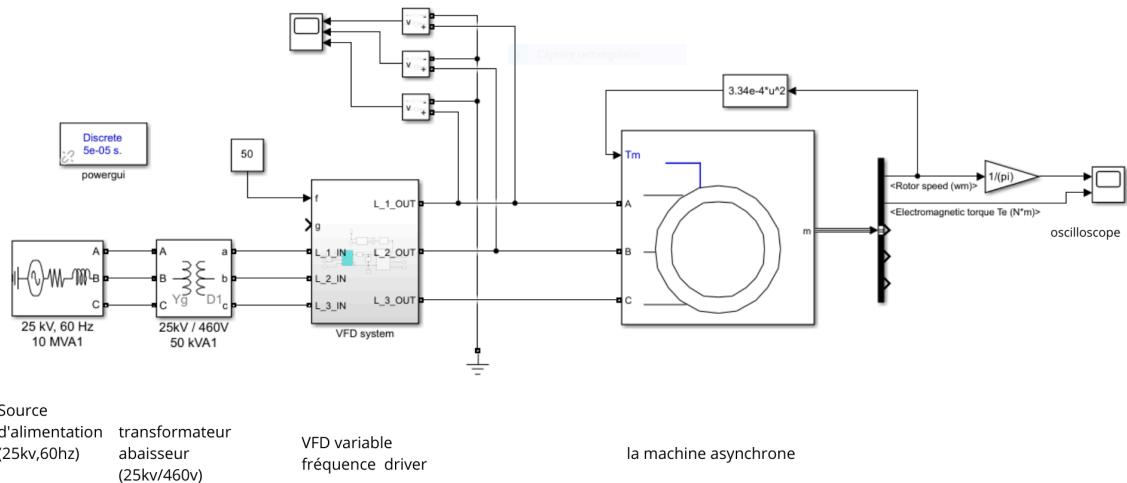
• simulation en Matlab d'un Entraînement Électrique par Variateur de Fréquence (VFD).

La simulation a été réalisée à l'aide de MATLAB/Simulink, un environnement puissant pour l'analyse des systèmes dynamiques. Le modèle développé inclut une source d'alimentation haute tension (25 kV, 60 Hz), un transformateur abaisseur (25 kV / 460 V), un VFD pour la régulation de la fréquence de sortie, ainsi qu'une charge mécanique dépendant de la vitesse de rotation du rotor. Ce montage permet de visualiser l'impact des variations de fréquence sur la réponse du moteur, notamment en termes de vitesse, de couple électromagnétique, et de performance énergétique.

Ce projet a permis de mieux comprendre le fonctionnement interne d'un VFD, sa structure de commande, ainsi que l'interaction complexe entre la fréquence d'alimentation, la tension, et la réponse dynamique du moteur. Il constitue une base solide pour la conception de systèmes de commande avancés destinés aux moteurs industriels.

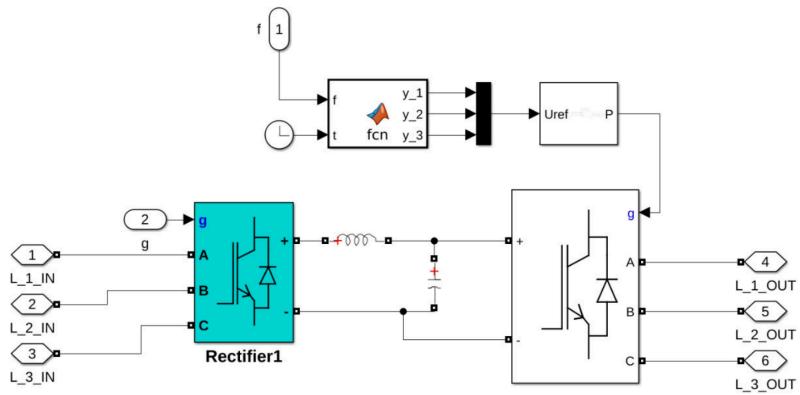
► simulation.

Dans le cadre de ce travail pratique, une simulation a été réalisée sous MATLAB/Simulink afin d'étudier le comportement d'une machine asynchrone triphasée alimentée par un variateur de fréquence (VFD – Variable Frequency Drive). Le système étudié vise à démontrer l'influence du VFD sur la vitesse de rotation et le couple développé par la machine, tout en reproduisant un scénario réaliste d'alimentation électrique industrielle.



Le montage global du système peut être décomposé en plusieurs blocs fonctionnels, chacun jouant un rôle précis dans la chaîne d'alimentation et de commande :

- Source d'alimentation triphasée (25 kV, 60 Hz, 10 MVA)** Cette source représente une alimentation haute tension typique d'un réseau électrique. Elle fournit une tension sinusoïdale triphasée utilisée comme entrée pour le transformateur.
- Transformateur abaisseur (25 kV / 460 V, 50 kVA)** Ce transformateur permet de réduire la tension de 25 kV à une tension plus adaptée (460 V) pour l'alimentation du VFD. Il utilise un couplage Δ , où le côté primaire est mis à la terre pour la sécurité, tandis que le côté secondaire en triangle assure un équilibrage efficace des charges.
- Variateur de fréquence (VFD)** Le VFD est le cœur du système de commande. Il reçoit une tension triphasée fixe (460 V) et une fréquence de commande (ici fixée à 50 Hz). En sortie, il génère une tension et une fréquence variables qui alimentent directement la machine asynchrone. Il permet ainsi de contrôler précisément la vitesse de rotation du moteur

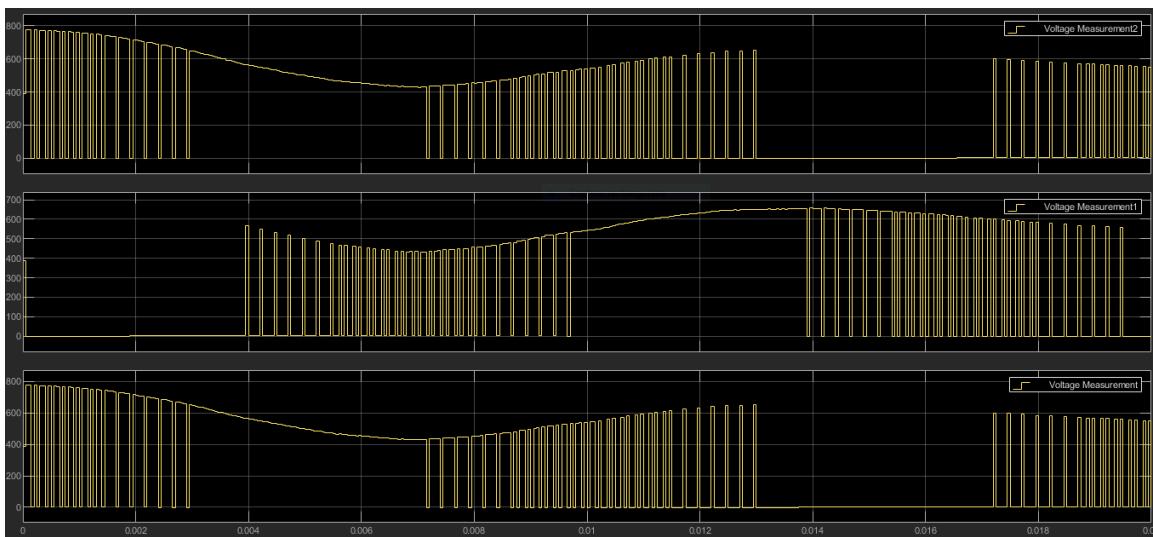


- **Machine asynchrone triphasée à cage**

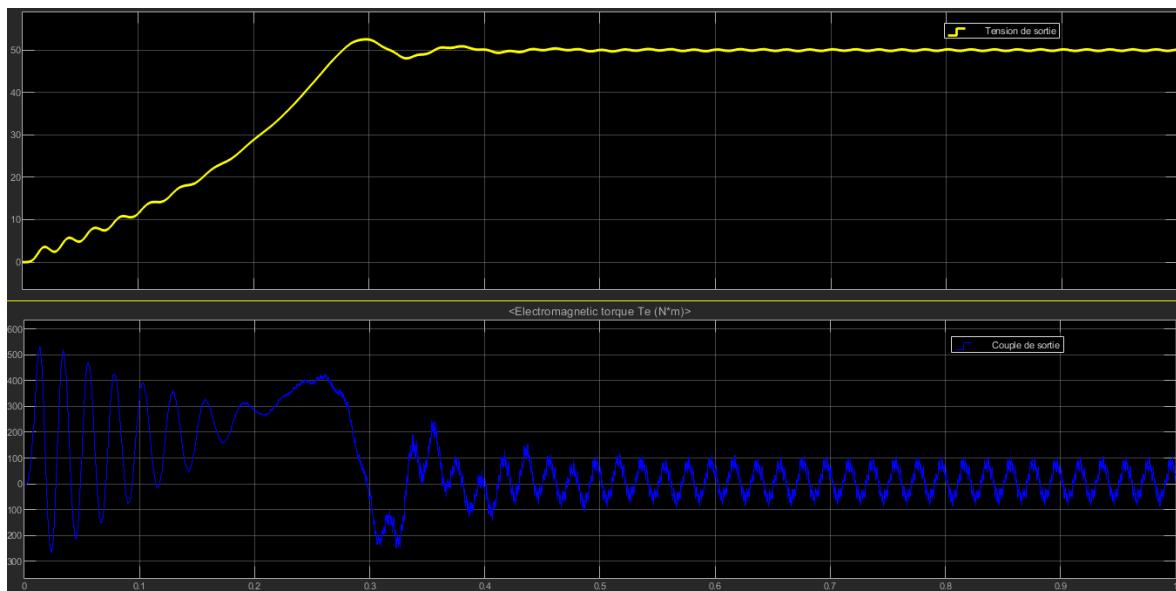
La machine reçoit la tension triphasée variable du VFD. Elle convertit l'énergie électrique en énergie mécanique, produisant ainsi un couple sur l'arbre moteur. La simulation permet de mesurer la vitesse angulaire du rotor (ω_m) et d'étudier sa réponse dynamique.

L'ensemble de cette simulation constitue une plateforme pédagogique efficace pour comprendre le rôle fondamental des VFD dans la commande de moteurs asynchrones. Elle permet également d'explorer l'impact des paramètres électriques sur les performances mécaniques de la machine, tout en illustrant les principes d'interconnexion entre les différents composants d'un système industriel d'entraînement électrique.

- **Tension de sortie de VFD.**

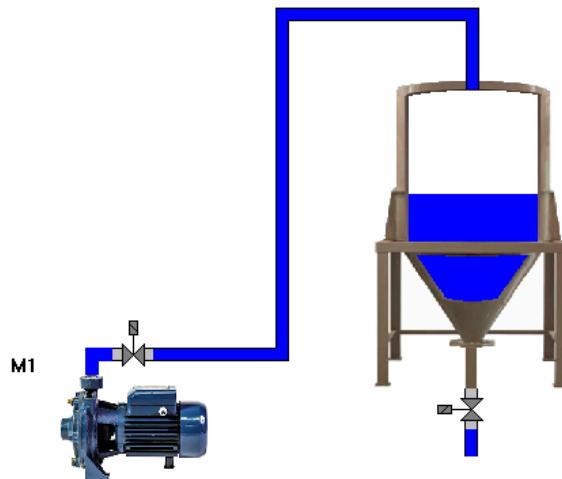


- Tension de sortie de machine asynchrone.



L'analyse de la tension de sortie et du couple de sortie d'une machine asynchrone révèle des comportements distincts mais complémentaires. La stabilité de la tension est indispensable pour un fonctionnement fiable, tandis que les variations du couple doivent être surveillées pour assurer une performance mécanique efficace. Ces résultats soulignent l'importance de ces deux paramètres dans l'évaluation des performances des machines asynchrones.

- Exemple de simulation d'une pompe hydraulique



La simulation du système pompe hydraulique comprend plusieurs composants clés, notamment une pompe électrique (M1) qui aspire l'eau d'un réservoir et la pousse à travers le système, ainsi que des vannes pour contrôler le débit. Lors de la simulation, la pompe M1 s'active pour faire circuler l'eau, qui est dirigée à travers un tuyau vers une sortie. Les vannes peuvent être ouvertes

ou fermées pour réguler le flux. Les paramètres à surveiller incluent le débit de la pompe, la pression dans le système pour garantir qu'elle reste dans des limites sûres, et le niveau d'eau dans le réservoir pour éviter les débordements ou les pompages à sec. Divers scénarios peuvent être explorés, tels que la variation de la vitesse de la pompe, les effets des vannes ouvertes ou fermées sur le débit, et l'impact d'un niveau d'eau faible ou d'une obstruction dans les tuyaux. L'objectif de cette simulation est de comprendre le comportement d'un système hydraulique simple, d'optimiser le fonctionnement de la pompe et de prévoir les problèmes potentiels. Cette approche permet aux utilisateurs d'expérimenter avec différents paramètres sans risque, tout en leur offrant une visualisation claire du fonctionnement du système.

7 | Conclusion

We have comprehensively explored and implemented three fundamental methods of electrical control: traditional relay-based systems, Programmable Logic Controllers (PLCs), and Variable Frequency Drives (VFDs). Our primary objective was to compare their performance, costs, and efficiency within the context of water pump control, while providing practical insights and recommending the optimal method for various applications.

We first highlighted the basics of electrical control systems, including open-loop and closed-loop concepts, and their essential role in industrial automation, improving efficiency, safety, and energy management. We demonstrated the evolution of control systems, from complex and less flexible electromechanical relays to more reliable and versatile programmable PLCs, emphasizing advancements in programmability, compact design, and reliability.

Our practical implementations, notably the modeling and simulation of an open-loop water pumping system with an asynchronous motor and an electrical drive system using a VFD, served to validate theoretical concepts and observe system behavior in various scenarios. These projects illustrated the VFD's ability to optimize energy consumption and precisely control motor speed, crucial aspects for operational efficiency.

In conclusion, we find that each control method presents specific advantages and limitations. While relay systems are simple but limited in flexibility and maintenance, PLCs offer increased programmability and versatility, becoming the backbone of modern automation. VFDs, on the other hand, stand out for their ability to optimize energy efficiency and precise motor regulation. Our findings indicate that the choice of the optimal control method depends on the specific application requirements, budget constraints, and desired level of complexity. We believe this report serves as a comprehensive resource for professionals, offering guidelines for the selection and implementation of these essential electrical control technologies.