

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة عين تموشنت - بلحاج بوشعيب
Université de Ain Témouchent - BELHADJ Bouchaib
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département d'Electronique et des Télécommunications



Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme de Master Académique

Domaine : Sciences & Technologies

Filière : Electronique

Spécialité : Instrumentation

Thème

Etude et Simulation du Fonctionnement d'un Ascenseur

Présenté par : Mlle AMARA NourElhouda

Mr RIAZI Abdelillah

Soutenu le 30 Juin 2026 devant le Jury :

Dr KHAOUANI Mohammed	M.C.A	U.A.T	Président
Dr SEKKAL Mansouria	M.C.A	U.A.T	Examinatrice
Dr ZEBENTOUT Abdel-Djawad	M.C.A	U.A.T	Encadrant

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicace

Je dédie ce travail

À mes chers parents, pour leurs sacrifices, leur soutien moral et matériel tout au long de mon parcours. Aucune dédicace ne saurait exprimer ma profonde gratitude envers vous. Que ce travail soit le fruit de vos efforts et de votre confiance en moi.

À mon frère, pour son soutien constant, ses encouragements et sa présence à mes côtés tout au long de ce parcours.

À mon encadreur, pour sa disponibilité, ses précieux conseils et son accompagnement tout au long de l'élaboration de ce mémoire.

À tous ceux qui me sont chers, et à toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Abdou

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à ma chère grand-mère, Dahmani Mezouara, que Dieu la protège et lui accorde santé et bien-être.

À mes chers parents, ma mère et mon père, en témoignage de mon amour et de ma profonde gratitude pour leurs sacrifices, leur soutien et leurs encouragements tout au long de mon parcours universitaire.

À mon frère et à mes chères sœurs.

À ma petite sœur Malak, qui a toujours été une source de joie et d'encouragement.

Enfin, à toutes les personnes qui m'ont soutenue et aidée, de près ou de loin, dans la réalisation de ce travail.

Houda

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le Tout-Puissant qui nous a donné la santé, le courage et la patience pour mener à bien ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre encadreur, Dr A. ZEBENTOUT, pour sa disponibilité, son suivi rigoureux et ses précieux conseils qui ont jalonné ce travail. Sa patience, ses orientations pertinentes et son soutien constant ont grandement contribué à la réussite de ce mémoire.

Nous adressons également nos sincères remerciements aux membres du jury Dr M. KHAOUANI et Dr M. SEKKAL qui nous ont fait l'honneur d'évaluer ce travail. Qu'ils trouvent ici l'expression de notre profond respect et de notre considération.

Nous remercions enfin nos familles et nos amis pour leur soutien moral et leurs encouragements durant toute la durée de ce travail, ainsi que toute personne ayant contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce mémoire.

Table des matières

Dédicace	i
Dédicace	ii
Remerciements	iii
Table des matières	iv
Liste des abréviations	vii
Liste des figures	viii
Liste des tableaux	ix
Introduction Générale.....	2
Chapitre I.....	5
Généralités et historique des ascenseurs	5
I.1. Introduction	5
I.2. Importance des ascenseurs dans l'urbanisation moderne	5
I.3. Historique et évolution des ascenseurs.....	5
I.3.1 Origines antiques : les systèmes mécaniques primitifs	5
I.3.2 La Révolution industrielle : vapeur et hydraulique	6
I.3.3 L'invention du frein de sécurité : Elisha Graves Otis.....	6
I.3.4 L'ère de l'électricité et les évolutions technologiques majeures	7
I.3.5 Les grands constructeurs mondiaux : panorama historique	8
I.4. Classification des ascenseurs	9
I.4.1 Classification par type de motorisation	9
I.4.2 Classification par usage.....	10
I.4.3 Classification par vitesse	11
I.5. Composants mécaniques, structurels et Electrique	12
I.5.1 Vue d'ensemble des composants principaux	12
I.5.2 La cabine et le contrepoids.....	14
I.5.3 Le système de guidage et les rails	14
I.5.4 Les mécanismes de sécurité	14
I.5.5 Les portes et systèmes d'accès.....	15
I.5.6 Les composants Electrique	16
I.6. Conclusion.....	17
Chapitre II	20
Description et fonctionnement	20
du système automatisé de l'ascenseur	20
II.1. Introduction	20

II.2.	Architecture générale d'un système d'ascenseur automatisé	20
II.2.1	Vue systémique : sous-systèmes et interactions	20
II.2.2	Flux d'informations et d'énergie dans le système	22
II.3.	Description du sous-système mécanique et de levage.....	23
II.3.1	Motorisation électrique	23
II.3.2	Système poulies-câbles et contrepoids	25
II.3.3	Freinage mécanique et sécurités intégrées	25
II.3.4	Capteurs de position et de vitesse	26
II.4.	Description du sous-système de contrôle-commande	27
II.4.1	Automate Programmable Industriel (API) ou contrôleur dédié	27
II.4.2	Architecture hardware : carte d'entrées/sorties, interfaces	28
II.4.3	Capteurs de sécurité	29
II.4.4	Actionneurs : contacteurs, variateurs de vitesse, électrovannes de frein	29
II.5.	Description du sous-système interface homme-machine (IHM).....	29
II.5.1	Boutons d'appel (palier) et de commande (cabine)	29
II.5.2	Afficheurs d'étage et indicateurs de direction	30
II.5.3	Systèmes de signalisation sonore et lumineuse	30
II.5.4	Systèmes de détection de présence.....	31
II.6.	Description du cycle de fonctionnement nominal	31
II.6.1	Séquence complète du cycle nominal	31
II.6.2	Modes de fonctionnement	32
II.6.3	Logique de priorité et d'attribution des appels [9, 29].....	33
II.7.	Sécurités et surveillances du système.....	34
II.7.1	Sécurités électriques	34
II.7.2	Sécurités mécaniques	35
II.7.3	Redondances et diagnostics de défauts	36
II.8.	Normes et contraintes de sécurité fonctionnelle	36
II.9.	Conclusion.....	37
Chapitre III	.....	39
Présentation d'ascenseur et de l'automate Twido	.....	39
III.1	Introduction	39
III.2	Présentation du monte-charge à trois niveaux.....	39
III.2.1	Contexte pédagogique et domaines d'application	39
III.2.2	Caractéristiques techniques de l'ascenseur didactique	40
III.2.3	Détail des blocs fonctionnels (fig. III.2)	43
III.3	L'automate programmable Twido (TWDLCAA24DRF)	44

III.3.1	Présentation générale.....	44
III.3.2	Description des entrées/sorties	45
III.3.3	Langages de programmation	46
III.3.4	Logiciel TwidoSuite et cycle de l'automate	47
III.4.	Conclusion.....	47
Chapitre IV	.....	50
Programmation et simulation	.....	50
IV.1	Introduction	50
IV.2	Présentation du logiciel TwidoSuit V2.0	50
IV.2.1	Présentation générale.....	50
IV.2.2	Modes de fonctionnement	50
IV.2.3	Architecture de l'interface barre d'étapes application	51
IV.2.4	Fonctionnalités principales du logiciel.....	54
IV.3	Définition du langage Ladder (LD).....	54
IV.3.1	Présentation du langage.....	54
IV.3.2	Elément de base du langage	55
IV.3.3	Règles fondamentales de programmation	56
IV.4	Affectation des Entrées/Sorties	57
IV.5	Organigramme de fonctionnement du système	59
IV.6	Programme Ladder complet sous TwidoSuite	63
IV.6.1	Architecture générale du programme	63
IV.6.2	Convention de notation	63
IV.6.3	Code Ladder complet	64
IV.7	Simulation du programme	68
IV.8	Conclusion.....	72
Conclusion Générale	.....	75
Bibliographie	.....	78
Annexe 01	.....	82
Normes et contraintes de sécurité fonctionnelle	.....	82
Annexe 02	.....	86
Caractéristiques techniques du Twido TWDLCAA24DRF [35]	.....	86
Résumé :	.....	88

Liste des abréviations

AC : Alternating Current — Courant alternatif

AI / AO : Analog Input / Analog Output — Entrée / Sortie analogique

API : Automate Programmable Industriel

CEI / IEC : Commission Électrotechnique Internationale

EN : Norme Européenne (European Norm)

HMI / IHM : Human Machine Interface / Interface Homme-Machine

IDE : Integrated Development Environment — Environnement de développement intégré

LD : Ladder Diagram — Langage à contacts (schéma à relais)

MRL : Machine-Room Less

MSAP : Moteur synchrone à aimants permanents

TOR : Tout ou Rien

VVVF: Variable Voltage Variable Frequency

Liste des figures

Figure I.1 : Ascenseurs à vapeur	6
Figure I.2 : Démonstration du frein de chute par Elisha Otis au Crystal Palace en 1854	7
Figure I.3 : Premier ascenseur électrique	7
Figure I.4 : Classification des ascenseurs par type de motorisation : (a) hydraulique ; (b) électriques à traction ; (c) à entraînement direct (MRL)	9
Figure I.5 : Vue générale de la structure de l'ascenseur	13
Figure II.1 : Schéma fonctionnel global du système d'ascenseur automatisé	21
Figure II.2 : machine gearless à aimants permanant	24
Figure II.3 : Illustration d'un frein à tambour	26
Figure II.4 : Illustration d'un frein d'urgence	26
Figure II.5 : Illustration d'un API Schneider	28
Figure II.6 : Boutons et panneaux de commande d'ascenseur	30
Figure III.1 : Vue d'ensemble du système didactique du monte-charge à trois niveaux	39
Figure III.2 : Brochage et identification des borniers de connexion (fiches banane 4 mm) sur la façade de commande	40
Figure III.3 : Détail de la façade de commande et du synoptique du monte-charge	41
Figure III.4 : API Twido	44
Figure III.5 : Bloc de visualisation	45
Figure III.6 : Connecteur TER et adaptateur de communication série RS-485	45
Figure III.7 : Entrées/Sorties de l'automate	46
Figure IV.1 : Fenêtre d'accueil Twido - Modes de fonctionnement	51
Figure IV.2 : Fenêtre création de projet.....	52
Figure IV.3 : Fenêtre de description des composants – Bibliothèque de composants.....	53
Figure IV.4 : Organigramme complet de fonctionnement de l'ascenseur	60

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Synthèse des principales innovations technologiques et des grands constructeurs d'ascenseurs	8
Tableau I.2 : Comparaison des types de motorisation	10
Tableau I.3 : Classification des ascenseurs par usage	10
Tableau I.4 : Classification des ascenseurs par vitesse.....	11
Tableau I.5 : Composants principaux d'un ascenseur à traction	12
Tableau I.6 : Dispositifs mécaniques de sécurité	15
Tableau I.7 : Principaux composants d'un ascenseur à traction	16
Tableau II.1 : Synthèse des flux d'informations et d'énergie	22
Tableau II.2 : Comparaison des technologies de motorisation	24
Tableau II.3 : Comparaison des technologies de capteurs de position	27
Tableau II.4 : Comparaison des algorithmes d'attribution des appels	34
Tableau III.1 : Caractéristiques techniques du monte-charge à trois niveaux	41
Tableau III.2 : Langages de programmation supportés par le Twido	46
Tableau IV.1 : Présentation des contacts en langage ladder	55
Tableau IV.2 : Présentation des bobines en langage ladder	55
Tableau IV.3 : Affectation des entrées TOR sur Twido TWDLCDA24DRF.	57
Tableau IV.4 : Affectation des sorties relais sur Twido TWDLCDA24DRF	58
Tableau IV.5 : Variable internes du programme sur Twido	59
Tableau IV.6 : Organisation du programme en groupes fonctionnels.....	63

Introduction Générale

Introduction Générale

L'ascenseur constitue aujourd'hui un élément essentiel de l'urbanisation moderne et du développement vertical des bâtiments. Son apparition a permis la construction des immeubles de grande hauteur et a profondément transformé l'organisation des villes contemporaines. Derrière sa simplicité apparente, l'ascenseur est un système automatisé complexe qui associe des technologies issues de la mécanique, de l'électrotechnique, de l'électronique industrielle et de l'automatisation. Son fonctionnement repose sur l'intégration de plusieurs sous-systèmes tels que les moteurs de traction, les capteurs, les dispositifs de sécurité, les variateurs de vitesse et les automates programmables industriels (API), qui doivent coopérer de manière fiable afin d'assurer le confort et la sécurité des usagers.

L'évolution des ascenseurs a été marquée par plusieurs avancées technologiques majeures. Depuis les premiers dispositifs de levage utilisés dans l'Antiquité jusqu'aux ascenseurs électriques modernes, de nombreuses innovations ont contribué à améliorer leurs performances et leur sécurité. L'invention du frein de sécurité par Elisha Otis au XIX^e siècle a constitué une étape déterminante dans la démocratisation de ce moyen de transport vertical. Plus récemment, l'apparition des ascenseurs sans local de machines (MRL pour Machine-Room Less) ainsi que des systèmes de commande intelligents a permis d'accroître l'efficacité énergétique, de réduire l'encombrement des installations et d'améliorer la gestion du trafic dans les bâtiments.

Dans les systèmes modernes, l'automatisation joue un rôle fondamental. L'API assure la gestion des informations provenant des différents capteurs, traite les demandes des utilisateurs, commande les actionneurs et supervise en permanence les fonctions de sécurité. Grâce à cette technologie, il est possible de garantir un fonctionnement fiable, précis et conforme aux exigences des normes internationales en vigueur. C'est un système complexe qui combine plusieurs domaines : l'électromécanique, l'électronique de puissance, le traitement du signal, la logique de commande et la sécurité fonctionnelle.

Le présent mémoire s'inscrit dans cette perspective et a pour objectif l'étude, la conception, la programmation et la simulation de la commande automatisée d'un ascenseur à trois étages. L'étude est réalisée sur un banc didactique mis à disposition par le département d'Electrotechnique de l'Université de Ain Témouchent. Ce système reproduit les principales

fonctionnalités d'un ascenseur industriel, notamment la motorisation, les capteurs de position, les dispositifs de sécurité, les portes motorisées et les interfaces de commande.

La commande du système est assurée par un automate programmable Schneider Electric Twido TWDLCDA24DRF, programmé sous l'environnement TwidoSuite V2.0 en langage Ladder (LD), conformément à la norme CEI 61131-3. Cette solution permet de mettre en œuvre des méthodes de programmation largement utilisées dans l'industrie et de développer des compétences directement applicables au domaine de l'automatisation industrielle.

La problématique principale de ce travail consiste à concevoir une commande automatisée capable d'assurer le fonctionnement complet d'un ascenseur à trois niveaux tout en respectant les exigences de sécurité et de fiabilité. Il s'agit notamment de gérer correctement les appels des utilisateurs, les déplacements de la cabine, l'ouverture et la fermeture des portes, ainsi que les situations particulières telles que l'arrêt d'urgence ou l'activation des fins de course.

Afin d'atteindre cet objectif, nous avons structuré notre mémoire en quatre chapitres :

- Le premier présente les généralités, l'historique et les principaux composants des ascenseurs.
- Le deuxième décrit le fonctionnement des systèmes automatisés modernes, leurs architectures de commande et les normes applicables.
- Le troisième est consacré à la présentation du matériel utilisé, notamment le banc didactique et l'automate programmable.
- Enfin, le quatrième chapitre détaille la conception du programme Ladder qui gère le fonctionnement de l'ascenseur, les simulations effectués et la validation des résultats à travers des tests représentatifs.

CHAPITRE I

Généralités et historique des ascenseurs

Chapitre I

Généralités et historique des ascenseurs

I.1. Introduction

L'ascenseur constitue aujourd'hui un élément infrastructurel indispensable dans l'architecture urbaine contemporaine. La réalisation de bâtiments de grande hauteur, symboles de l'urbanisation intensive du XXI^e siècle, demeurerait inconcevable sans le développement continu des systèmes d'élévation mécanisés. Le marché mondial des ascenseurs et escaliers mécaniques, évalué à plus de 100 milliards de dollars en 2025 [1], témoigne de l'ampleur économique de ce secteur et de son rôle structurant dans l'industrie du bâtiment.

Dans ce premier chapitre, nous allons donner une analyse approfondie des généralités relatives aux ascenseurs. Nous aborderons d'abord leur évolution historique, depuis les mécanismes primitifs de l'Antiquité jusqu'aux technologies les plus récentes, puis leur classification selon différents critères techniques, ainsi que les principaux composants mécaniques et structurels nécessaires à leur fonctionnement. Cette étude préliminaire nous permettra de poser les bases essentielles pour mieux comprendre les systèmes automatisés d'ascenseurs, qui constituent le cœur de notre travail.

I.2. Importance des ascenseurs dans l'urbanisation moderne

L'essor considérable de la construction verticale observé depuis la fin du XIX^e siècle trouve son origine directe dans l'invention de l'ascenseur sécurisé. Avant cette avancée technologique, la hauteur des édifices était intrinsèquement limitée par les contraintes physiologiques de l'être humain : les étages élevés demeuraient inaccessibles aux personnes à mobilité réduite et peu attractifs en raison de l'effort physique requis pour gravir les escaliers [2]. L'introduction de systèmes d'élévation fiables a permis la démocratisation de l'habitat en hauteur et la valorisation des espaces aériens en milieu urbain dense. Selon les estimations du secteur, les produits KONE déplacent quotidiennement environ deux milliards de personnes à travers le monde [13], illustrant le caractère vital de cette infrastructure.

I.3. Historique et évolution des ascenseurs

I.3.1 Origines antiques : les systèmes mécaniques primitifs

Les premiers dispositifs d'élévation mécanisée remontent à l'Antiquité. Vers 2500 avant J.-C., les Égyptiens auraient utilisé un système de poulies pour le transport de pierres pesant jusqu'à

2,5 tonnes lors de la construction des pyramides [11]. Vers 236 avant J.-C., le mathématicien, physicien et astronome grec Archimède conçoit un système d'élévation primitif utilisant des câbles et des poulies, selon les écrits de l'architecte romain Vitruve [13].

À Rome, le Colisée, construit vers 80 après J.-C., abritait au moins vingt-huit ascenseurs actionnés par force musculaire. Ces dispositifs, composés de structures en bois, de câbles, de poulies et de treuils doubles, permettaient de transporter gladiateurs et animaux sauvages des souterrains jusqu'à l'arène, nécessitant l'effort de quatre personnes par système [11]. Au Moyen Âge, la technologie du treuil continue d'être employée ; les cours royales européennes adoptent progressivement ces mécanismes, comme en témoigne la « chaise volante » installée au château de Versailles en 1743 par Louis XV [11].

I.3.2 La Révolution industrielle : vapeur et hydraulique

L'invention de la machine à vapeur à la fin du XVIIIe siècle marque un tournant décisif. Vers 1770, les ascenseurs à vapeur font leur apparition dans les mines britanniques [11]. En 1793, l'ingénieur russe Ivan Kulibin construit le premier ascenseur à vis sans fin, installé dans le Palais d'Hiver du tsar à Saint-Pétersbourg, constituant l'une des étapes les plus importantes depuis l'Antiquité [11]. Dès le début du XIXe siècle, les premiers ascenseurs hydrauliques apparaissent dans les usines, mais les risques fréquents de rupture des cordes en chanvre, tuant ou blessant sévèrement les usagers, limitent considérablement le transport de personnes [12].

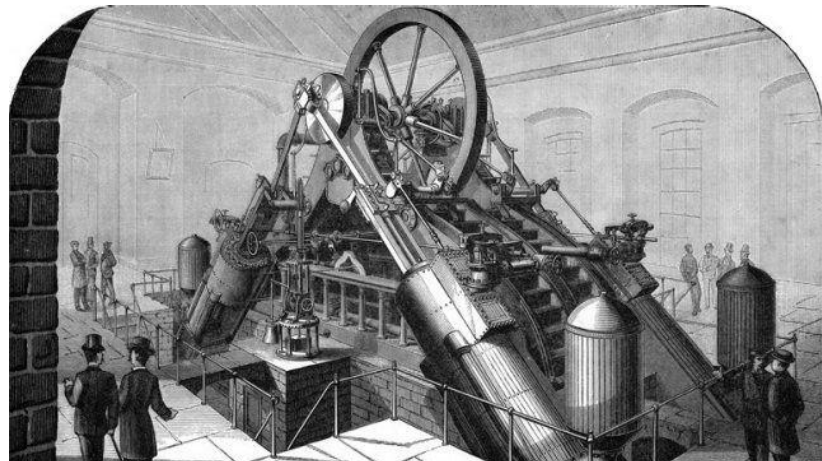


Figure I.1 : Ascenseurs à vapeur [11].

I.3.3 L'invention du frein de sécurité : Elisha Graves Otis

La naissance de l'ascenseur moderne est indissociable de la figure d'Elisha Graves Otis (Halifax, Vermont, 3 août 1811 – Yonkers, New York, 8 avril 1861). En 1852, alors mécanicien en chef dans une usine de cadres de lits à Yonkers, il conçoit un dispositif de

freinage automatique le « safety hoist » empêchant la chute de la cabine en cas de rupture du câble [13].

Événement fondateur : En mai 1854, lors de l'Exposition Universelle de New York au Crystal Palace, Elisha Otis réalise une démonstration spectaculaire. Suspendu sur une plateforme au-dessus de la foule, il ordonne de couper le câble porteur à la hache. Le frein se déclenche instantanément. Il s'écrie alors : « All safe, gentlemen ! » [13]. Ce moment est unanimement considéré comme le point de départ de l'ère des ascenseurs sécurisés et, par extension, celle des gratte-ciels.

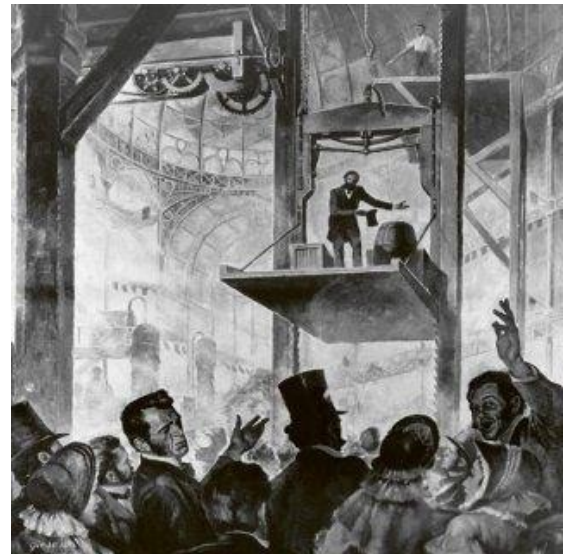


Figure I.2 : Démonstration du frein de chute par Elisha Otis au Crystal Palace en 1854 [11].

I.3.4 L'ère de l'électricité et les évolutions technologiques majeures

L'avènement de l'électricité transforme profondément les systèmes d'ascenseurs. En 1880, lors du Salon industriel de Mannheim, Werner von Siemens présente le premier ascenseur actionné par un moteur électrique, éliminant le recours aux machines à vapeur et aux systèmes hydrauliques [11]. En 1887, Alexander Miles dépose un brevet pour la fermeture automatique des portes d'ascenseur, améliorant considérablement la sécurité des passagers [11].

L'automatisation progresse rapidement au XXe siècle : introduction du contrôle par bouton-poussoir en Angleterre en 1904, premier système de commande collective à bouton-poussoir par Otis en 1907, et automatisation totale éliminant les opérateurs humains dès 1924 [4].



Figure I.3 : Premier ascenseur électrique [11].

I.3.5 Les grands constructeurs mondiaux : panorama historique

Le marché mondial des ascenseurs est structuré autour de quatre acteurs majeurs dont l'histoire s'étend sur plus d'un siècle.

Tableau I.1 : Synthèse des principales innovations technologiques et des grands constructeurs d'ascenseurs [4].

Année	Innovation	Constructeur	Pays d'origine	Impact
1853	Invention du frein de sécurité	Otis	États-Unis	Sécurisation des ascenseurs, base du développement moderne
1874	Fondation de Schindler	Schindler	Suisse	Leader mondial des ascenseurs et escaliers mécaniques
1880	Premier ascenseur électrique	Siemens	Allemagne	Remplacement de la vapeur et de l'hydraulique
1903	Machine de traction sans engrenage	Otis	États-Unis	Amélioration de l'efficacité et réduction du bruit
1910	Fondation de KONE	KONE	Finlande	Acteur majeur de l'innovation dans les ascenseurs
1996	Ascenseur sans local de machine (MRL – MonoSpace)	KONE	Finlande	Gain d'espace, intégration du moteur dans la gaine
2003	Système TWIN (double cabine)	thyssenkrupp	Allemagne	Augmentation de la capacité de transport (~30 %)
2013	UltraRope® (câble en fibre de carbone)	KONE	Finlande	Réduction du poids, ascenseurs très grande hauteur
2017	MULTI (ascenseur sans câble)	Thyssenkrupp	Allemagne	Déplacement vertical et horizontal innovant.

I.4. Classification des ascenseurs

Les ascenseurs sont classés selon plusieurs critères essentiels, notamment le type de motorisation utilisé, leur domaine d'usage ainsi que leur vitesse de fonctionnement.

I.4.1 Classification par type de motorisation

La distinction fondamentale entre les ascenseurs s'effectue selon leur principe de motorisation. On distingue principalement trois catégories.

- a. Les ascenseurs hydrauliques** (fig. I.4.a) : Ils fonctionnent selon le principe de Pascal. La cabine est hissée sans contrepoids par un piston télescopique déployé par l'injection d'huile sous pression via une centrale oléo-électrique. L'évacuation de cette huile permet à la cabine de descendre [15]. Ces systèmes sont adaptés aux espaces restreints et aux hauteurs moyennes (15 à 18 m maximum), mais leur consommation énergétique est supérieure à celle des systèmes à traction en l'absence de contrepoids [15].
- b. Les ascenseurs électriques à traction** (fig. I.4.b) : Ils utilisent un système de poulies et de câbles associé à un contrepoids. On distingue les systèmes à engrenages (treuil à vis sans fin ou planétaire) et les systèmes sans engrenages (gearless), où le moteur entraîne directement la poulie de traction [15]
- c. Les ascenseurs à entraînement direct (MRL)** (fig. I.4.c) : Ils intègrent un moteur à aimants permanents (PMSM) directement dans la gaine, supprimant le local de machinerie. Cette configuration, introduite par KONE en 1996, optimise l'espace utile du bâtiment [13].

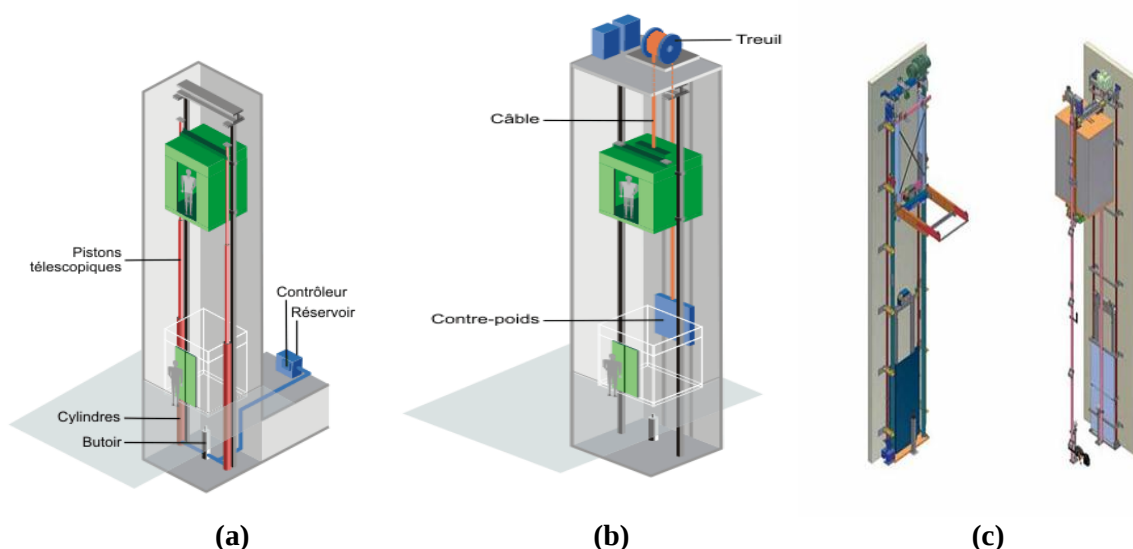


Tableau I.2 : Comparaison des types de motorisation [4, 15]

Critère	Hydraulique	Traction à engrenages	Traction gearless / MRL
Principe moteur	Vérin hydraulique (piston + huile)	Moteur électrique + réducteur + câbles	Moteur PMSM + câbles (sans réducteur) [15]
Contrepoids	Non	Oui	Oui
Course maximale	15–18 m	Jusqu'à 150 m	> 500 m (voire > 1 000 m avec UltraRope) [4]
Vitesse typique	0,15–1,0 m/s	1,0–2,5 m/s	2,5–20 m/s
Local de machinerie	Requis (au sous-sol)	Requis (en toiture)	Non requis (machinerie dans la gaine)
Efficacité énergétique	Faible	Moyenne	Élevée (réduction de 50–80 % [4])
Applications typiques	Bâtiments basse hauteur, charges lourdes	Immeubles moyenne hauteur	Toutes hauteurs, gratte-ciel

I.4.2 Classification par usage

Les ascenseurs se déclinent en plusieurs catégories fonctionnelles selon leur type d'usage. Sur le tableau I.3 sont représentés les différents cas possibles.

Tableau I.3 : Classification des ascenseurs par usage [2, 8, 18, 31].

Type	Usage principal	Caractéristiques spécifiques
Passagers	Transport de personnes (résidentiel, commercial, public)	Finitions soignées ; portes automatiques ; accessibilité PMR conforme [8]
Charges / Monte-charges	Transport de marchandises, palettes, équipements	Charge élevée (jusqu'à 10 000 kg) ; cabine large et renforcée ; finitions industrielles [2]
Hospitaliers	Transport de brancards, lits médicalisés, matériel médical	Cabine de grandes dimensions ; mouvements doux ; système de priorité d'appel [2]

Panoramiques / Observatoires	Transport touristique vers des points d'observation	Parois vitrées ; conception esthétique ; haute capacité (ex. : Tour Eiffel, avec 3 ascenseurs visiteurs)[18]
Pompiers / Évacuation	Accès des secours en cas d'urgence	Alimentation autonome ; commande prioritaire ; résistance au feu [31]

I.4.3 Classification par vitesse

La vitesse de déplacement constitue un critère de classification pertinent, en particulier pour les bâtiments de grande hauteur. Sur le tableau I.4 sont représentés les différentes vitesses en fonction de leurs typiques applications.

Tableau I.4 : Classification des ascenseurs par vitesse [10, 14, 15].

Catégorie	Vitesse	Application typique	Exemple notable
Lent	$\leq 1,0$ m/s	Bâtiments de faible hauteur (< 15 m) ; ascenseurs hydrauliques	Résidences basse hauteur [15]
Normal	1,0 – 2,5 m/s	Immeubles de moyenne et grande hauteur	Immeubles de bureaux standard[15]
Rapide	2,5 – 6,0 m/s	Tours de grande hauteur	Otis SkyRise (jusqu'à 12,5 m/s)[10]
Ultra-rapide	> 6,0 m/s	Gratte-ciel, supertall buildings	Guangzhou CTF (Hitachi) : 20 m/s (72 km/h), 95 étages en 43 s[14]

Parmi les records mondiaux de vitesse, le Guangzhou CTF Finance Center en Chine détient le titre avec des ascenseurs Hitachi atteignant 72 km/h (1 200 m/min). La Shanghai Tower suit avec 69 km/h et la Taipei 101 avec 61 km/h [14]. Ces systèmes ultra-rapides nécessitent des technologies sophistiquées de régulation de la pression atmosphérique, de réduction des vibrations par moteurs magnétiques, et de freinage d'urgence haute performance [14].

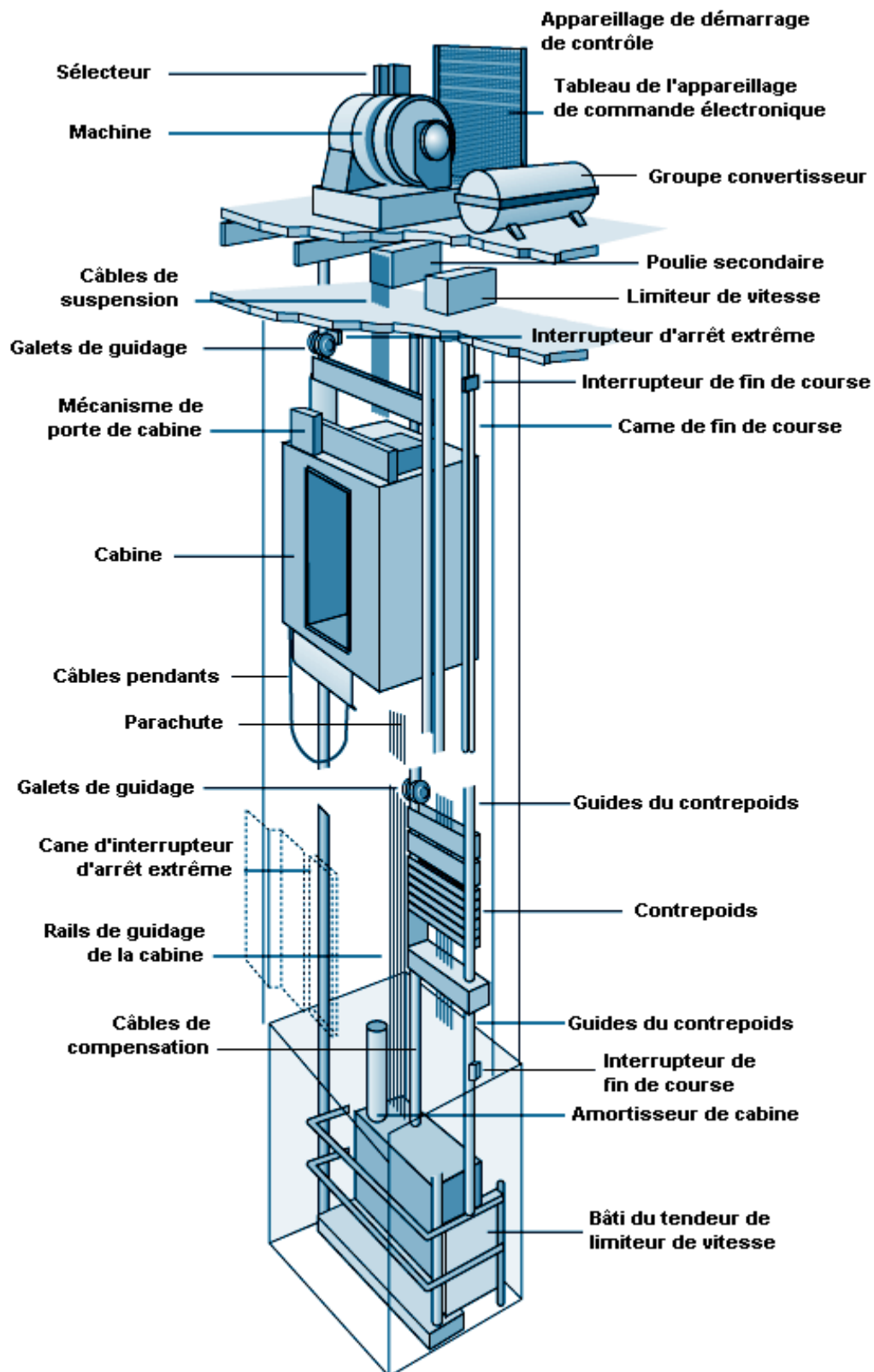
I.5. Composants mécaniques, structurels et Electrique

I.5.1 Vue d'ensemble des composants principaux

Un ascenseur, quel que soit son type, repose sur un ensemble de composants mécaniques et structurels interdépendants. Sur la figure I.5 et le tableau I.5, on peut voir une description des différents constituants de l'ascenseur avant le développement détaillé de chaque sous-système.

Tableau I.5 : Composants principaux d'un ascenseur à traction [3, 4, 17]

Composant	Fonction	Matériaux / Caractéristiques
Cabine	Accueil des passagers ou des charges	Châssis en acier ; parois en inox, stratifié ou verre ; plancher antidérapant [3]
Contrepoids	Équilibrage du poids de la cabine + 40–50 % de la charge utile	Cadre métallique rempli de gueuses en fonte ou béton [3]
Câbles de traction	Liaison mécanique cabine–contrepoids via poulie	Acier tressé ou fibre de carbone (UltraRope) [4]
Rails de guidage	Maintien du positionnement vertical de la cabine et du contrepoids	Profilés en acier en T ou en forme creuse [17]
Rails de guidage	Contact glissant entre cabine/contrepoids et rails	Patins à glissement ou à rouleaux [17]
Gaine (puits)	Espace vertical clos contenant la cabine et les équipements	Béton armé ou maçonnerie ; ventilation obligatoire [3]
Cuvette	Partie inférieure de la gaine, sous le niveau le plus bas	Contient les amortisseurs ; doit rester sèche [3]
Amortisseurs	Absorption d'énergie en cas de dépassement des niveaux limites	Amortisseurs à ressort (faible vitesse) ou hydrauliques (haute vitesse) [3]



Source: d'après Otis Elevator Company, New York.

Figure I.5 : Vue générale de la structure de l'ascenseur [3].

I.5.2 La cabine et le contrepoids

La cabine constitue l'élément structurel central accueillant les passagers ou les charges. Elle est construite autour d'un châssis métallique rigide, dénommé étrier, composé d'un ensemble de fers profilés qui soutiennent la cabine et servent de point d'attache aux câbles de traction [3]. Les dimensions de la cabine sont normalisées et doivent respecter les prescriptions réglementaires en matière d'accessibilité et de charge nominale.

Le contrepoids compense le poids de la cabine et d'une fraction de sa charge nominale (généralement 40 à 50 %). Il est constitué d'un cadre métallique dans lequel sont empilées des gueuses en fonte ou en béton. Ce système d'équilibrage réduit significativement la puissance motrice requise : le moteur n'a plus qu'à vaincre la différence de poids entre la cabine chargée et le contrepoids, ce qui diminue considérablement la consommation énergétique [3].

I.5.3 Le système de guidage et les rails

Le guidage de la cabine et du contrepoids est assuré par des rails métalliques fixés aux parois de la gaine. Ces rails servent à :

- **Maintenir** le positionnement vertical des éléments mobiles ;
- **Absorber** les forces de réaction latérales lors des mouvements de translation ;
- **Servir de surface de freinage** pour les mécanismes de parachute en cas d'urgence [17].

Les patins de guidage, fixés sur l'étrier de la cabine et sur le contrepoids, existent en deux technologies principales :

- **Patins à glissement** : contact direct métal/métal ou avec garniture composite, adaptés aux vitesses lentes ;
- **Patins à rouleaux (ou « guide à rouleaux »)** : réduction de la friction et des vibrations pour les vitesses élevées [17].

I.5.4 Les mécanismes de sécurité

La sécurité des ascenseurs repose sur un ensemble de dispositifs mécaniques redondants dont le fonctionnement est indépendant de tout système de commande. Ce principe de redondance constitue le fondement de la philosophie de sécurité en ascenseurs.

Tableau I.6 : Dispositifs mécaniques de sécurité [3, 14, 16, 21]

Dispositif	Fonction	Principe de fonctionnement
Limiteur de vitesse	Surveillance continue de la vitesse de la cabine	Lorsque la vitesse dépasse la valeur autorisée (10–15 % de la vitesse nominale), l'effet centrifuge bloque le dispositif et interrompt le mouvement [16]
Parachute instantané	Blocage immédiat de la cabine sur les rails	Le limiteur déclenche un levier qui active des patins de coincement sur les guides ; applicable pour $v \leq 0,63$ m/s [21]
Parachute progressif	Freinage progressif de la cabine sur les rails	Mécanisme à rouleaux assurant une décélération contrôlée ; applicable pour $v \leq 2,50$ m/s [21]
Amortisseurs de cuvette	Absorption de l'énergie cinétique en fin de course	Amortisseurs à ressort ($v \leq 1$ m/s) ou hydrauliques ($v > 1$ m/s) [3]
Verrouillage des portes palières	Interdiction d'ouverture hors zone de déverrouillage	Dispositifs de serrure électromécanique à double contact [14]

Fonctionnement du système limiteur–parachute : Tout commence par le limiteur de vitesse. Lorsque la vitesse d'intervention est dépassée — c'est-à-dire lorsqu'une accélération anormale est détectée — le limiteur intervient en donnant un signal au mécanisme à levier du parachute. Ce dernier s'active en serrant les rails de guidage, bloquant ainsi l'installation. Le parachute ne nécessite normalement aucun entretien courant, mais une vérification semestrielle est recommandée [21].

I.5.5 Les portes et systèmes d'accès

Les portes d'ascenseur constituent un élément critique de sécurité. Elles se décomposent en :

- **Portes palières** (à chaque niveau desservi) : elles ferment l'accès à la gaine et sont munies de serrures électromécaniques empêchant toute ouverture intempestive ;
- **Portes de cabine** (à ouverture latérale, centrale ou télescopique) : elles assurent la fermeture de la cabine proprement dite [14].

I.5.6 Les composants Electrique

Au-delà de ses éléments mécaniques et structurels, l'ascenseur intègre un ensemble de composants électriques et électroniques indispensables à son fonctionnement.

L'équipement électrique d'un ascenseur se répartit entre plusieurs emplacements fonctionnels : l'armoire de commande (ou armoire de manœuvre), située à l'extérieur de la gaine généralement au dernier niveau ou dans un local dédié ; la machinerie, où se trouvent le moteur et le frein ; la gaine, traversée par le câblage et les capteurs ; et la cabine, équipée de l'éclairage, du panneau de commande et de la signalisation. L'armoire de commande constitue le « cerveau » de l'installation : elle transmet les ordres passés par les utilisateurs à l'ascenseur, contrôle l'ouverture et la fermeture des portes ainsi que la vitesse de déplacement.

Tableau I.7 : Principaux composants d'un ascenseur à traction [3, 20, 21].

Composant	Fonction principale	Caractéristiques essentielles
Moteur électrique	Conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique de rotation pour entraîner la poulie de traction	Moteur asynchrone triphasé (installations classiques) ou moteur synchrone à aimants permanents — MSAP (installations MRL modernes)
Variateur de vitesse (VFD)	Régulation de la fréquence et de la tension d'alimentation du moteur pour contrôler la vitesse et le couple	Commande VVVF (Variable Voltage Variable Frequency) ; permet des profils d'accélération/décélération progressifs pour le confort des passagers
Armoire de commande (manœuvre)	Centralisation de la logique de commande, des circuits de puissance et de la chaîne de sécurité	Contient l'automate programmable (API) ou le contrôleur dédié, les contacteurs, les relais, les fusibles, le disjoncteur principal et les borniers de raccordement
Contacteurs de puissance	Commutation de l'alimentation électrique vers le moteur (sens montée/descente)	Contacteurs électromagnétiques commandés par l'API ; assurent également une fonction de coupure de sécurité redondante

Frein électromagnétique	Immobilisation de la cabine à l'arrêt et freinage d'urgence	Frein à manque de courant (fail-safe) : des ressorts appliquent le freinage lorsque la bobine n'est plus alimentée — toute coupure de courant entraîne automatiquement l'arrêt
Câblage et filerie	Acheminement des signaux et de l'énergie entre les différents éléments	Glottes d'alimentation (canalisations des fils dans la gaine) et pendentifs (câbles souples reliant la cabine mobile à l'installation fixe)
Alimentation électrique	Fourniture de l'énergie au système	Réseau triphasé 380/400 V – 50 Hz (circuit de puissance) ; monophasé 230 V (circuit d'éclairage et auxiliaires)
Éclairage de cabine et de gaine	Éclairage fonctionnel et de sécurité	Intensité minimale de 100 lux en cabine et 50 lux en gaine ; éclairage de secours obligatoire sur batterie [
Alimentation de secours	Maintien des fonctions essentielles en cas de coupure du réseau	Onduleur ou batterie assurant l'alimentation de l'éclairage de secours, de la communication d'urgence et, dans certains cas, du déplacement vers le palier le plus proche

I.6. Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons établi les fondements historiques, techniques des systèmes d'ascenseurs. De l'ingéniosité d'Archimède aux performances vertigineuses des ascenseurs ultra-rapides des gratte-ciel asiatiques, l'évolution de cette technologie illustre la capacité de l'ingénierie humaine à résoudre les défis de la mobilité verticale. Les classifications établies par motorisation, par usage et par vitesse permettent d'appréhender la diversité des solutions techniques adaptées aux besoins spécifiques de chaque application.

Les composants mécaniques et structurels analysés cabine, contrepoids, système de guidage, mécanismes de sécurité à redondance constituent les éléments fondamentaux sur lesquels reposent la fiabilité et la sécurité des installations.

Ces éléments mécaniques et structurels, bien qu'indispensables, ne constituent qu'une partie du système global. Le fonctionnement harmonieux et sécurisé d'un ascenseur moderne nécessite l'intégration de systèmes de commande et d'automatisation sophistiqués, assurant la gestion des appels, le contrôle des mouvements et la supervision des fonctions de sécurité. Ces aspects, relevant de l'instrumentation électronique et des systèmes automatisés, feront l'objet des chapitres suivants.

CHAPITRE II

Description et fonctionnement du système automatisé de l'ascenseur

Chapitre II

Description et fonctionnement du système automatisé de l'ascenseur

II.1. Introduction

Dans le premier chapitre de ce mémoire, nous avons situé l'ascenseur dans son contexte historique et rappelé les principes mécaniques fondamentaux qui ont marqué son évolution, depuis le treuil rudimentaire d'Archimède jusqu'aux systèmes modernes à grande vitesse. Cette évolution met clairement en évidence un tournant technologique majeur : le passage d'un système purement mécanique, commandé manuellement, à un système entièrement automatisé intégrant des technologies avancées d'instrumentation, de commande numérique et de sécurité.

Dans ce chapitre, on va s'intéresser au fonctionnement global d'un ascenseur automatisé moderne. L'objectif est de donner une vision claire et complète de son architecture, en répondant à une question essentielle : que fait exactement le système, et comment ses différentes parties interagissent-elles ?

On va présenter successivement l'architecture générale du système, le sous-système de levage, le système de commande, l'interface utilisateur, le cycle de fonctionnement, ainsi que les dispositifs de sécurité. Enfin, on terminera par un aperçu des normes et des contraintes de sécurité qui encadrent ces systèmes.

II.2. Architecture générale d'un système d'ascenseur automatisé

II.2.1 Vue systémique : sous-systèmes et interactions

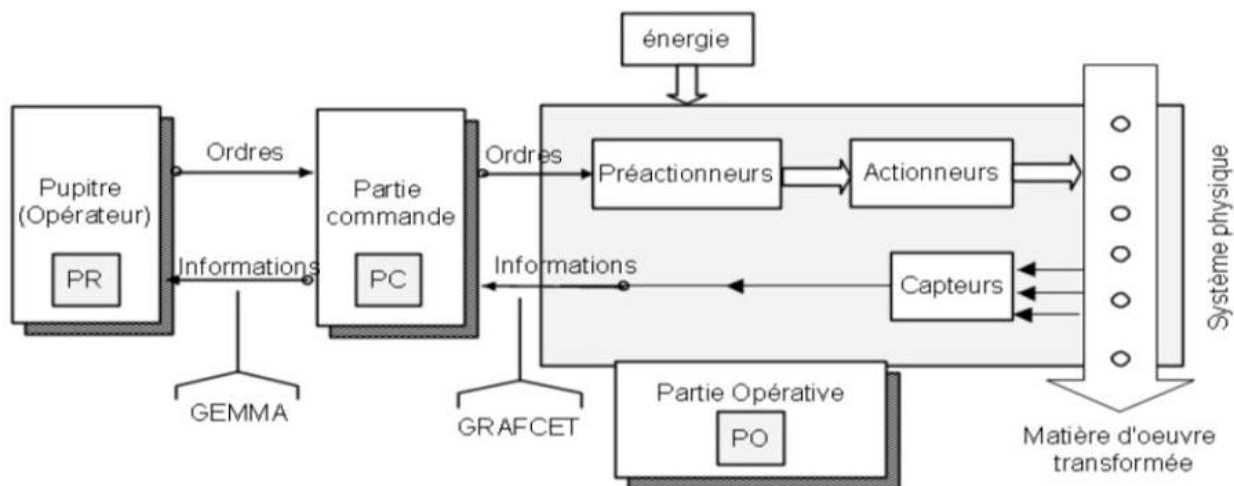
Un ascenseur automatisé constitue un exemple représentatif de système automatisé de production tel que défini par la norme CEI 61131-3. Conformément au modèle classique de l'automatique industrielle, tout système automatisé peut être représenté sous la forme d'un schéma identifiant trois parties principales et exprimant leurs interrelations [2, 3] :

a) La Partie Opérative (PO) — Elle constitue l'organe de puissance du système. Dans le cas de l'ascenseur, la partie opérative regroupe l'ensemble des éléments mécaniques, électromécaniques et hydrauliques qui réalisent physiquement le déplacement de la cabine : le moteur de traction, le système de poulies et câbles, les freins mécaniques, les portes et leurs

mécanismes d'entraînement, les guides de cabine et de contrepoids. La partie opérative reçoit des ordres de la partie commande via les pré-actionneurs (contacteurs, variateurs de fréquence) et les actionneurs (moteurs), et renvoie des informations sur l'état du processus via les capteurs (capteurs de position, codeurs, détecteurs de fin de course) [6, 7].

b) La Partie Commande (PC) — Elle représente le « cerveau » du système. Son rôle est de traiter les informations provenant des capteurs de la partie opérative et des organes de dialogue de l'interface homme-machine, puis de générer les ordres appropriés vers les pré-actionneurs conformément au programme inscrit dans sa mémoire. Dans les installations modernes, la partie commande est assurée par un Automate Programmable Industriel (API) ou un contrôleur dédié embarqué [3, 4]. L'automate exécute un programme cyclique qui gère la logique séquentielle du fonctionnement de l'ascenseur : prise en charge des appels, gestion des priorités, contrôle du mouvement, supervision des sécurités.

c) La Partie Relation (PR) ou Interface Homme-Machine (IHM) — Elle assure le dialogue entre le système automatisé et les utilisateurs (passagers) ainsi que le personnel de maintenance. Elle comprend les boutons d'appel aux paliers, les boutons de commande en cabine, les afficheurs d'étage, les indicateurs de direction, les systèmes de signalisation sonore et lumineuse, ainsi que les dispositifs d'alarme et de communication d'urgence [7, 9].



préactionneurs et les actionneurs, tout en recevant en retour des informations issues des capteurs qui surveillent l'état du système physique.

Le Pupitre (PR), manipulé par l'opérateur, transmet les ordres initiaux à la partie commande et reçoit en retour les informations nécessaires pour suivre l'état du système.

II.2.2 Flux d'informations et d'énergie dans le système

Le fonctionnement du système repose sur deux types de flux distincts mais interdépendants :

Flux d'énergie — L'énergie électrique provenant du réseau triphasé (380/400 V, 50 Hz en Algérie) alimente le variateur de fréquence, qui la convertit en tension et fréquence variables pour piloter le moteur de traction. Le moteur transforme l'énergie électrique en énergie mécanique rotative, transmise à la poulie motrice qui, par l'intermédiaire des câbles de traction, assure le déplacement vertical de la cabine et du contrepoids. En phase de freinage régénératif, le flux d'énergie peut s'inverser : le moteur fonctionne en générateur et l'énergie cinétique est soit dissipée dans une résistance de freinage, soit réinjectée dans le réseau [20, 21].

Flux d'informations — Les capteurs et détecteurs de la partie opérative transmettent en permanence à l'API des informations sur l'état du système : position de la cabine, vitesse de déplacement, état des portes (ouverte/fermée/en mouvement), état du frein, charge en cabine, état des dispositifs de sécurité. Parallèlement, l'IHM transmet à l'API les demandes des usagers (appels palier et commandes cabine). L'API traite l'ensemble de ces informations conformément à son programme et génère les ordres de commande vers les actionneurs. Ce traitement est cyclique, avec un temps de cycle typiquement compris entre 1 et 10 ms pour les automates modernes [19, 22].

Tableau II.1 : Synthèse des flux d'informations et d'énergie [20, 21].

Type de flux	Source	Destination	Nature du signal
Énergie électrique	Réseau triphasé	Variateur de fréquence	380V / 50Hz
Énergie électrique variable	Variateur (VFD)	Moteur de traction	Tension/fréquence variables
Énergie mécanique	Moteur	Poulie → Câbles →	Couple rotatif

		Cabine	
Information de position	Codeur rotatif / Capteurs d'étage	API (entrées)	Signal numérique
Information de vitesse	Codeur incrémental	API / Variateur	Signal numérique
État des portes	Capteurs Po / Pf	API (entrées TOR)	Signal logique (0/1)
Commande utilisateur	Boutons d'appel / cabine	API (entrées TOR)	Signal logique (0/1)
Ordre de mouvement	API (sorties)	Variateur / Contacteurs	Signal analogique / numérique
Signalisation	API (sorties)	Afficheurs / Voyants / Buzzer	Signaux logiques / série

II.3. Description du sous-système mécanique et de levage

II.3.1 Motorisation électrique

Le moteur de traction constitue le cœur énergétique de l'ascenseur. Son rôle est de convertir l'énergie électrique en énergie mécanique pour assurer le déplacement vertical de la cabine. Deux grandes familles de machines de traction coexistent dans les installations modernes [23] :

a) Machine à traction avec réducteur (geared traction machine) — Dans cette configuration traditionnelle, un moteur asynchrone triphasé à grande vitesse (typiquement 1000 à 1500 tr/min) entraîne un réducteur à vis sans fin qui réduit la vitesse de rotation et augmente le couple transmis à la poulie de traction. Le rapport de réduction est généralement compris entre 1:30 et 1:60. Cette technologie, bien que robuste et éprouvée, présente des inconvénients notables : pertes mécaniques dans le réducteur (rendement de 40 à 65 %), niveau sonore élevé, nécessité d'une lubrification régulière, et encombrement important nécessitant une salle de machines dédiée [23].

b) Machine à traction sans réducteur (gearless traction machine) — Cette technologie moderne, utilisée notamment par KONE avec le moteur EcoDisc® et par Otis

avec le Gen2®, repose sur un moteur synchrone à aimants permanents (PMSM — Permanent Magnet Synchronous Motor) fonctionnant à basse vitesse et fort couple. Lorsque le courant triphasé traverse les enroulements du stator, un champ magnétique tournant est généré. Le rotor, équipé d'aimants permanents en néodyme, se synchronise avec ce champ et produit un couple sans glissement [23]. Le nombre élevé de pôles magnétiques (typiquement 16 à 40 pôles) permet au moteur de fonctionner directement à la vitesse requise (60 à 200 tr/min) sans nécessiter de réducteur mécanique. La poulie de traction est directement montée sur l'arbre moteur. Cette configuration élimine les pertes du réducteur, réduit considérablement l'encombrement et le bruit, et offre un rendement supérieur à 90 %, ce qui a permis le développement des ascenseurs sans local de machines (Machine Room Less — MRL) [23].

Tableau II.2 : Comparaison des technologies de motorisation [23, 24].

Caractéristique	Machine avec réducteur	Machine sans réducteur (Gearless)
Type de moteur	Asynchrone triphasé	Synchrone à aimants permanents (PMSM)
Vitesse moteur	1000–1500 tr/min	60–200 tr/min
Réducteur	Vis sans fin (rapport 1:30 à 1:60)	Aucun (entraînement direct)
Rendement global	40–65 %	> 90 %
Niveau sonore	Élevé	Faible
Encombrement	Salle de machines requise	Compatible MRL
Maintenance	Lubrification réducteur	Réduite
Applications typiques	Bâtiments anciens, faible trafic	Immeubles modernes, grande hauteur

Figure II.2 : machine gearless à aimants permanent [23].



II.3.2 Système poulies-câbles et contrepoids

Le système de suspension et de levage d'un ascenseur à traction repose sur le principe de l'adhérence entre les câbles (ou courroies) et la poulie motrice. Les câbles de traction, généralement au nombre de 4 à 8, sont constitués de torons d'acier tressés (diamètre typique 8 à 12 mm) offrant une résistance à la traction élevée tout en conservant une flexibilité suffisante pour s'enrouler sur les poulies. Dans les installations récentes, des courroies plates en acier gainé de polyuréthane remplacent les câbles traditionnels, offrant une durée de vie accrue, un poids réduit et un fonctionnement plus silencieux [23, 24].

Le contrepoids, généralement dimensionné à la masse de la cabine vide plus 40 à 50 % de la charge nominale, permet d'équilibrer partiellement le système et de réduire considérablement la puissance motrice nécessaire. En situation d'équilibre parfait (cabine chargée à 50 % de la charge nominale), le moteur ne fournit que le couple nécessaire pour vaincre les frottements [6, 23].

La poulie de déflexion, présente dans certaines configurations, modifie la trajectoire des câbles pour adapter la géométrie de l'installation aux contraintes architecturales du bâtiment. L'angle d'enroulement des câbles sur la poulie motrice est un paramètre critique : il doit être suffisant pour garantir l'adhérence sans glissement, typiquement supérieur à 120° [6].

II.3.3 Freinage mécanique et sécurités intégrées

Le système de freinage d'un ascenseur moderne comporte deux niveaux fonctionnellement distincts :

a. Frein de service (frein électromécanique) : Il s'agit d'un frein à disque ou à tambour, normalement fermé par l'action de ressorts de compression et ouvert par un électroaimant alimenté durant le fonctionnement normal. Ce principe de conception « fail-safe » (sécurité positive) garantit l'arrêt automatique de la cabine en cas de coupure d'alimentation électrique. Les installations modernes utilisent un système de freinage double (dual brake), c'est-à-dire deux circuits de freinage indépendants dont chacun est capable, seul, de maintenir la cabine à l'arrêt avec sa charge nominale [23]. Conformément à la norme EN 81-20, chaque circuit de freinage doit pouvoir être testé indépendamment.

Figure II.3 : Illustration d'un frein à tambour [23].



b. Frein d'urgence (parachute) : Le parachute est un dispositif de sécurité mécanique purement passif dont le fonctionnement est directement lié à celui du limiteur de vitesse. Lorsque la vitesse d'intervention est dépassée, le limiteur de vitesse intervient en donnant un signal mécanique au mécanisme à levier du parachute, qui s'active en serrant les guides et en bloquant la cabine [25]. On distingue deux types de parachutes : le parachute instantané (vitesses nominales $\leq 0,63$ m/s), et le parachute progressif (vitesses nominales jusqu'à 2,50 m/s) [25].



Figure II.4 : Illustration d'un frein d'urgence [25].

II.3.4 Capteurs de position et de vitesse

La mesure précise de la position et de la vitesse de la cabine est essentielle au fonctionnement correct de l'ascenseur [26].

a. Codeurs rotatifs (encodeurs) : Montés en bout d'arbre du moteur ou sur la poulie de traction, les codeurs fournissent une information précise sur la position angulaire et la vitesse de rotation. On distingue :

b. Capteurs de position d'étage (capteurs TOR) : Des détecteurs inductifs ou magnétiques sont disposés à chaque niveau de la gaine. On distingue les capteurs de ralentissement (CRV) et les capteurs de positionnement (CP) [6, 7].

c. Résolveurs : Certaines installations utilisent des résolveurs comme alternative aux codeurs, offrant une robustesse mécanique supérieure [23].

Tableau II.3 : Comparaison des technologies de capteurs de position [26].

Caractéristique	Codeur incrémental	Codeur absolu	Résolveur
Information fournie	Position relative, vitesse	Position absolue, vitesse	Position absolue, vitesse
Résolution typique	1000–4096 imp/tour	12–25 bits/tour	12–16 bits (après conversion)
Comportement après coupure	Perte de position	Position conservée	Position conservée
Interface	A/B/Z (signaux carrés)	EnDat, SSI, BiSS	Signaux sinusoïdaux (sin/cos)
Robustesse	Moyenne	Bonne	Excellente
Coût	Faible	Moyen à élevé	Moyen

II.4. Description du sous-système de contrôle-commande

II.4.1 Automate Programmable Industriel (API) ou contrôleur dédié

Le sous-système de contrôle-commande constitue le centre décisionnel de l'ascenseur automatisé. Un automate programmable industriel (API) est un système électronique numérique programmable destiné au contrôle de processus industriels par un traitement séquentiel [8, 19]. Les principaux constructeurs d'API utilisés dans le domaine des ascenseurs sont :

- **Siemens :** La gamme SIMATIC S7-300 et la gamme plus récente S7-1200/S7-1500, programmées sous l'environnement TIA Portal [19, 22].
- **Schneider Electric :** La gamme Modicon M340, programmée sous Unity Pro [9].
- **Allen-Bradley (Rockwell Automation) :** Les automates CompactLogix et MicroLogix [22].

Le choix de l'API dépend de la complexité de l'installation (nombre d'étages, nombre de cabines en batterie, fonctionnalités avancées), du nombre d'entrées/sorties nécessaires, des exigences de temps de réponse et du niveau de sécurité requis (SIL).

II.4.2 Architecture hardware : carte d'entrées/sorties, interfaces

L'architecture matérielle s'organise autour de l'API central et de ses modules d'extension [19, 22] :

- a. **Unité centrale (CPU) :** Elle exécute le programme de commande de manière cyclique (temps de cycle de 1 à 10 ms). Par exemple, le CPU 314 de la gamme Siemens S7-300 offre une mémoire de travail de 128 Ko et gère jusqu'à 1024 entrées/sorties numériques [7, 19].
- b. **Modules d'entrées numériques (DI) :** Ils reçoivent les signaux tout-ou-rien (TOR) des capteurs et boutons-poussoirs. Une installation standard de 10 étages nécessite typiquement 40 à 60 entrées numériques [22].
- c. **Modules de sorties numériques (DO) :** Ils commandent les pré-actionneurs et éléments de signalisation. Typiquement 20 à 40 sorties numériques sont requises [22].
- d. **Modules d'entrées/sorties analogiques (AI/AO) :** Pour le pilotage du variateur de fréquence et la mesure de la charge en cabine [19].
- e. **Interfaces de communication :** L'API communique avec le variateur (via PROFIBUS-DP, PROFINET, Modbus RTU ou CANopen), avec les terminaux IHM, et avec un système de supervision centralisée [22].

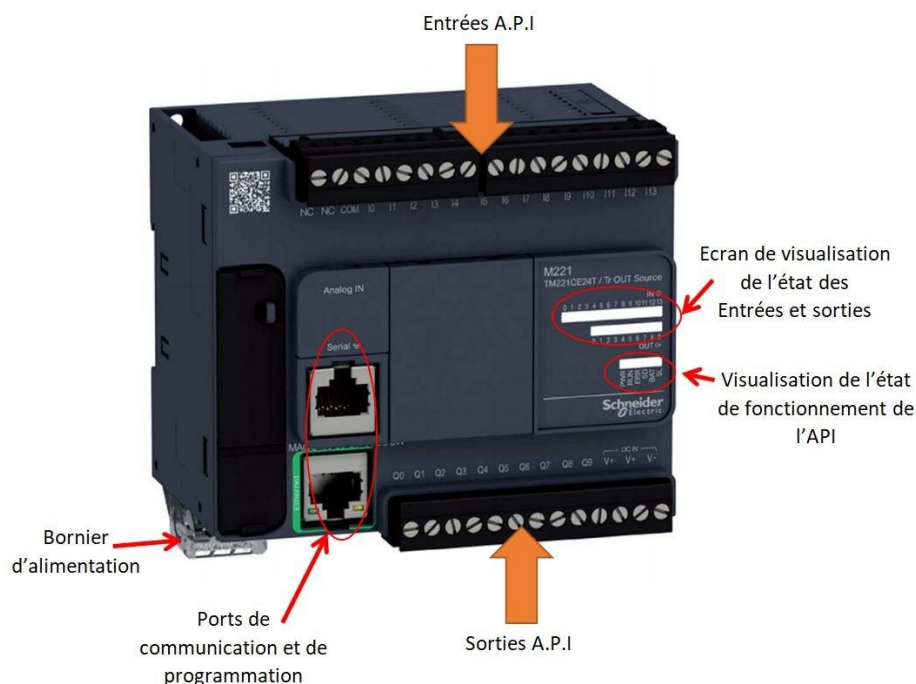


Figure II.5 : Illustration d'un API Schneider [19].

II.4.3 Capteurs de sécurité

Le système de contrôle-commande reçoit les informations d'un ensemble de capteurs de sécurité [6, 22] :

- a. **Détecteurs de fin de course (FCH / FCB)** : contacts normalement fermés coupant directement l'alimentation du moteur en extrémité de gaine [6].
- b. **Contacts de porte** : contacts de verrouillage mis en série formant la chaîne de sécurité des portes [13, 19].
- c. **Capteur de surcharge** : cellules de charge sous le plancher de la cabine [6, 22].
- d. **Détecteurs de présence aux portes** : barrières infrarouges (rideaux lumineux) [27].

II.4.4 Actionneurs : contacteurs, variateurs de vitesse, électrovannes de frein

Les actionneurs et pré-actionneurs du système de commande transforment les ordres de l'API en actions physiques sur la partie opérative [19] :

- a. **Variateur de fréquence (VFD)** : Il convertit la tension du réseau en tension variable pour piloter le moteur avec un contrôle vectoriel de flux (FOC). Les principaux modèles sont le Schneider Electric Altivar ATV930/ATV950 et le Siemens SINAMICS V20/G120 [20, 21]. Les économies d'énergie atteignent jusqu'à 60 % par rapport aux systèmes conventionnels [21].
- b. **Contacteurs de puissance** : Pour les fonctions de commutation : contacteur principal d'isolement, contacteurs de direction, contacteur d'alimentation du frein [6, 19].
- c. **Électrovannes et relais de frein** : La commande du frein est séquencée : libération après établissement du couple moteur, application après arrêt complet [23].

II.5. Description du sous-système interface homme-machine (IHM)

II.5.1 Boutons d'appel (palier) et de commande (cabine)

L'interface de commande de l'ascenseur est constituée de deux catégories de boutons-poussoirs [6, 7, 9] :

- a. **Boutons d'appel palier** : Installés à chaque étage à côté de la porte palière, ils permettent aux usagers de signaler leur souhait d'utiliser l'ascenseur. Aux étages intermédiaires, deux boutons sont généralement présents (montée ▲ et descente ▼), tandis qu'au rez-de-

chaussée seul le bouton monté est disponible et au dernier étage seul le bouton descente. Un voyant lumineux intégré au bouton confirme l'enregistrement de l'appel. Dans les systèmes à commande collective sélective, la direction de l'appel est enregistrée et prise en compte dans l'algorithme d'attribution [6, 9].

b. Boutons de commande cabine : Disposés sur un panneau de commande à l'intérieur de la cabine, ils comprennent : les boutons de destination (un par étage desservi), le bouton d'ouverture de porte (◀▶), le bouton de fermeture de porte (▶◀), le bouton d'alarme (□), et le bouton d'arrêt d'urgence (selon les réglementations). Les boutons sont rétroéclairés et s'allument lorsque l'appel est enregistré. Conformément à la norme EN 81-70, le panneau de commande doit être accessible aux personnes à mobilité réduite, avec une signalisation en braille et des boutons disposés à une hauteur comprise entre 900 et 1200 mm [7].



Figure II.6 : Boutons et panneaux de commande d'ascenseur [9].

II.5.2 Afficheurs d'étage et indicateurs de direction

- Afficheur de position en cabine (LED 7 segments, LCD/TFT)
- Indicateurs de direction (flèches ▲ ▼)
- Afficheurs palier transmis par bus de communication [9]

II.5.3 Systèmes de signalisation sonore et lumineuse

- Signal sonore d'arrivée (gong)
- Alarme de surcharge

- Alarme d'urgence avec interphonie conforme à EN 81-28
- Éclairage de cabine : 100 lux minimum (EN 81-20), secours 5

II.5.4 Systèmes de détection de présence

- a. **Barrières infrarouges (rideaux lumineux) :** 40 à 176 faisceaux sur toute la hauteur de l'ouverture [27].
- b. **Détection 3D :** Capteurs à temps de vol (ToF) pour l'anticipation d'approche [27].
- c. **Bord sensible (sensitive edge) :** Profilé élastique avec micro-contact .

II.6. Description du cycle de fonctionnement nominal

II.6.1 Séquence complète du cycle nominal

Le fonctionnement nominal d'un ascenseur automatisé s'effectue selon une séquence déterministe composée de dix phases successives clairement identifiées [6, 7]. Le passage d'une phase à la suivante est conditionné par la satisfaction de conditions logiques vérifiées en permanence par l'API [6, 7].

Phase 1 / État de repos (Idle) : La cabine est à l'arrêt à un étage, portes fermées, frein appliqué. Tous les contacts de sécurité de la chaîne de sécurité sont fermés (portes verrouillées, pas d'arrêt d'urgence, poids dans les limites, limiteur de vitesse non déclenché). L'API est en attente d'un appel (palier ou cabine) [6, 7].

Phase 2 / Réception et traitement de l'appel : Un usager appuie sur un bouton d'appel au palier ou sur un bouton de destination en cabine. L'API enregistre l'appel dans sa table de requêtes, allume le voyant de confirmation du bouton, et détermine la direction de déplacement requise en comparant l'étage de destination à l'étage actuel.

Phase 3 / Démarrage et accélération : L'API envoie la consigne de vitesse au variateur de fréquence et commande la libération du frein. Le variateur établit d'abord le couple moteur de maintien (prévention du recul), puis libère progressivement le frein et accélère le moteur selon un profil de vitesse en S (profil trapézoïdal adouci) pour assurer le confort des passagers. L'accélération typique est de 0,8 à 1,2 m/s² [20, 21].

Phase 4 / Déplacement à vitesse nominale : La cabine se déplace à la vitesse nominale (typiquement 1,0 à 2,5 m/s pour les immeubles résidentiels, jusqu'à 10 m/s pour les tours de

grande hauteur). L'API surveille en continu la position de la cabine via le codeur et les capteurs d'étage, et vérifie l'état de la chaîne de sécurité.

Phase 5 / Décélération et ralentissement : Lorsque la cabine approche de l'étage de destination, le capteur de ralentissement (CRV) est activé. L'API commande la décélération progressive du moteur via le variateur, passant de la vitesse nominale à la vitesse de nivellement (typiquement 0,05 à 0,15 m/s). Le profil de décélération est en S pour minimiser les secousses [6, 20].

Phase 6 / Arrêt et nivellement précis : Le capteur de position d'étage (CP) confirme l'alignement de la cabine avec le palier. Le variateur effectue un positionnement fin (nivellement) avec une précision de ± 3 à ± 10 mm. Le moteur est arrêté et le frein mécanique est appliqué [6, 22, 26].

Phase 7 / Ouverture des portes : L'API commande l'ouverture simultanée de la porte de cabine et de la porte palière (couplées mécaniquement par un mécanisme d'entraînement). La durée d'ouverture complète est typiquement de 2 à 4 secondes. Les barrières infrarouges sont activées dès le début de l'ouverture.

Phase 8 / Temporisation de maintien : Les portes restent ouvertes pendant une durée programmable (typiquement 3 à 30 secondes selon la configuration). Ce temps permet l'entrée et la sortie des passagers. Le compteur de temporisation est réinitialisé à chaque détection de passage par le rideau lumineux [6, 7].

Phase 9 / Fermeture des portes : À l'expiration de la temporisation, l'API commande la fermeture des portes. Si un obstacle est détecté par le rideau lumineux ou le bord sensible, la fermeture est interrompue et les portes se réouvrent avec réinitialisation de la temporisation. Une fois la fermeture complète, les contacts de verrouillage se referment.

Phase 10 / Retour à l'état de repos ou traitement de l'appel suivant : Si d'autres appels sont en attente dans la table de requêtes, l'API passe directement à la phase 3 pour le prochain déplacement. Sinon, la cabine revient à l'état de repos (phase 1)

II.6.2 Modes de fonctionnement

Outre le mode normal décrit ci-dessus, un ascenseur automatisé moderne dispose de plusieurs modes de fonctionnement spéciaux, sélectionnables par des commutateurs à clé ou activés automatiquement par le système [6, 28] :

- a. **Mode normal (automatique) :** C'est le mode de fonctionnement principal, L'ascenseur répond automatiquement aux appels des usagers selon l'algorithme de gestion des priorités programmé dans l'API.
- b. **Mode inspection (révision) :** Ce mode est activé par un commutateur à clé situé sur le toit de la cabine ou en salle de machines. Il permet au technicien de maintenance de déplacer la cabine manuellement à petite vitesse (typiquement 0,3 m/s) par maintien d'un bouton de commande (homme mort). Toutes les commandes automatiques sont désactivées, mais toutes les sécurités restent actives. Ce mode est utilisé pour les inspections périodiques, le réglage des capteurs et les interventions de maintenance [6, 28].
- c. **Mode pompier :** Conformément à la norme EN 81-72, le mode pompier est activé par un interrupteur à clé spécifique (généralement au rez-de-chaussée). Lorsque ce mode est activé, toutes les demandes d'étages préalables des passagers sont inhibées, et la cabine revient automatiquement à l'étage d'accès des pompiers (généralement le rez-de-chaussée). L'ascenseur est alors exclusivement commandé depuis la cabine par les sapeurs-pompiers pour les opérations de secours [28].
- d. **Mode secours / délestage :** En cas de coupure de l'alimentation principale, un système d'alimentation de secours (batterie/onduleur) prend le relais et assure le déplacement de la cabine jusqu'à l'étage le plus proche, l'ouverture des portes et l'évacuation des passagers. Ce fonctionnement dégradé est conforme aux exigences de la norme EN 81-20 [28].
- e. **Mode parking :** En l'absence d'appel pendant une durée programmable, la cabine se dirige automatiquement vers un étage prédéfini (généralement le rez-de-chaussée) pour optimiser le temps de réponse aux appels les plus fréquents [9].

II.6.3 Logique de priorité et d'attribution des appels [9, 29]

La gestion des appels dans un ascenseur automatisé repose sur un algorithme d'attribution qui détermine l'ordre de service des étages de manière à optimiser le temps d'attente et le temps de trajet des usagers, nous décrivons ici les principes fonctionnels des principaux algorithmes :

- a. **Commande collective sélective en descente (Collective Down) :** L'ascenseur répond à tous les appels cabine et à tous les appels palier dans le sens de la descente. Les appels palier en montée ne sont servis qu'en fin de course descendante. Ce mode est utilisé dans les immeubles résidentiels à trafic majoritairement descendant (retour au rez-de-chaussée).
- b. **Commande collective sélective complète (Full Collective Selective) :** L'algorithme le plus courant dans les installations modernes. L'ascenseur dessert successivement tous les appels enregistrés dans le sens de déplacement actuel (montée ou descente), puis inverse sa

direction et dessert les appels dans le sens opposé. Ce principe, analogue à l'algorithme SCAN en informatique, minimise les changements de direction et optimise le parcours [29].

c. Commande par destination (Destination Control) : Dans les systèmes avancés pour batteries d'ascenseurs, le passager indique sa destination avant d'entrer dans la cabine (via un clavier ou un écran tactile au palier). Un algorithme central attribue la cabine optimale en fonction de la destination, du chargement actuel des cabines et de la minimisation du temps de trajet global [29].

Tableau II.4 : Comparaison des algorithmes d'attribution des appels [29].

Algorithme	Principe	Application typique	Performance
Collective descente	Service des appels descente en priorité	Immeubles résidentiels simples	Moyenne
Collective sélective complète	Service dans le sens courant puis inversion	Immeubles tertiaires et résidentiels	Bonne
Contrôle par destination	Attribution optimale de cabine	Tours de bureaux, batteries multiples	Excellente

II.7. Sécurités et surveillances du système

II.7.1 Sécurités électriques

Les sécurités électriques constituent la première ligne de défense du système et agissent sur la chaîne de sécurité câblée, indépendamment du programme de l'API [6] :

a. Chaîne de sécurité (safety chain) : La chaîne de sécurité est un circuit électrique série constitué de la mise en série de tous les contacts de sécurité critiques : contacts de verrouillage des portes palières, contact de verrouillage de la porte cabine, contact du limiteur de vitesse, contacts de fin de course haute et basse, bouton d'arrêt d'urgence en cabine, contact anti-mou de câble, et contact de la trappe de secours. L'ouverture de n'importe quel contact de cette chaîne provoque l'arrêt immédiat de la motorisation et l'application du frein, indépendamment de l'état de l'API [6]. Ce principe garantit un niveau de sécurité intrinsèque conforme aux exigences de sécurité fonctionnelle.

b. Coupure d'urgence : Un ou plusieurs boutons d'arrêt d'urgence (coup de poing rouge), conformes à la norme EN ISO 13850, sont disposés en cabine et en salle de machines

(ou sur le panneau de commande en cuvette pour les installations MRL). Leur action est directe sur la chaîne de sécurité, sans traitement logiciel.

c. Surveillance de vitesses : Le variateur de fréquence et/ou l'API surveille en permanence la vitesse réelle de la cabine (mesurée par le codeur) et la compare à la vitesse de consigne. Un dépassement de vitesse de plus de 15 % au-dessus de la vitesse nominale provoque l'arrêt contrôlé par le variateur. Un dépassement plus important (typiquement 115 % de la vitesse nominale) déclenche le limiteur de vitesse mécanique [21].

d. Surveillance des défauts électriques : Les variateurs de fréquence modernes intègrent des fonctions de surveillance complètes : surintensité moteur, défaut d'isolement, surtension/sous-tension d'alimentation, surchauffe du moteur et du variateur (via sonde PTC/PT100), perte de phase, et défaut de communication. Chaque défaut génère un code d'erreur spécifique enregistré dans le journal de bord de l'installation [20, 21, 22].

II.7.2 Sécurités mécaniques

Les sécurités mécaniques constituent le dernier recours en cas de défaillance de toutes les sécurités électriques et électroniques [25] :

a) Parachute de cabine : le parachute est un dispositif mécanique qui bloque la cabine sur ses guides en cas de survitesse descendante. Il est activé par le limiteur de vitesse via un câble mécanique. Le système est conçu pour fonctionner sans aucune alimentation électrique, ce qui en fait un dispositif de sécurité intrinsèque [25]. Selon la vitesse nominale de l'installation, on utilise un parachute instantané ($\leq 0,63$ m/s) ou progressif ($\leq 2,50$ m/s) [25].

b) Limiteur de vitesse : Le limiteur de vitesse est un régulateur centrifuge installé en partie haute de la gaine, entraîné par un câble bouclé relié à la cabine. Lorsque la vitesse de la cabine dépasse un seuil prédéfini (typiquement 115 % de la vitesse nominale pour le premier seuil électrique, et 130 à 140 % pour le seuil mécanique de déclenchement du parachute), le limiteur se bloque et actionne le parachute via le câble de liaison [25].

c) Amortisseurs (tampons) : Des amortisseurs sont installés en fond de cuvette (fosse), sous la cabine et sous le contrepoids, pour absorber l'énergie cinétique en cas de dépassement des fins de course. Selon la vitesse nominale, on utilise des amortisseurs à ressorts (pour des vitesses ≤ 1 m/s) ou des amortisseurs hydrauliques à huile (pour des vitesses supérieures). Ils constituent la dernière barrière de protection en cas de défaillance de tous les autres systèmes d'arrêt [6].

d) Guides et fixations anti-déraillement : Les guides métalliques (en T ou tubulaires) et les coulisseaux ou galets de guidage de la cabine et du contrepoids sont dimensionnés pour

résister aux efforts de freinage du parachute et aux efforts sismiques dans les zones concernées [6].

II.7.3 Redondances et diagnostics de défauts

La fiabilité du système de sécurité repose sur le principe de redondance et de diagnostic continu [22] :

a) Redondance des freins : Le système de freinage double (dual brake) constitue une redondance active : chaque circuit de frein est dimensionné pour maintenir seul la cabine avec sa charge nominale. L'API effectue un test périodique de chaque circuit de frein indépendamment (test à la mise sous tension et à intervalles réguliers) [23].

b) Redondance des capteurs de sécurité : Les capteurs les plus critiques (fin de course, limiteur de vitesse) sont souvent doublés : un canal est traité par l'API (sécurité logicielle), l'autre agit directement sur la chaîne de sécurité câblée (sécurité hardware) .

c) Diagnostic embarqué : Les automates modernes et les variateurs de fréquence intègrent des fonctions de diagnostic avancées : surveillance des temps de réponse des contacteurs, détection de la dégradation des contacts, surveillance de la résistance d'isolement, comptage des cycles de fonctionnement des composants d'usure (freins, portes, câbles), et journalisation horodatée de tous les événements et défauts [20, 21, 22]. Ces informations peuvent être transmises à un centre de télésurveillance via une connexion Ethernet ou GSM pour une maintenance prédictive.

II.8. Normes et contraintes de sécurité fonctionnelle

La conception et l'exploitation des ascenseurs sont encadrées par un corpus normatif exigeant, dont les principales normes applicables sont :

- Cadre normatif applicable aux ascenseurs
- Exigences SIL (Safety Integrity Level)
- Catégories de sécurité selon EN ISO 13849
- Redondance des chaînes de sécurité critique

Ces normes sont présentées en annexe 01, elles concernent les règles de sécurité pour la construction et l'installation des élévateurs (Ascenseurs pour le transport de personnes et de charges), l'accessibilité aux ascenseurs pour toutes les personnes y compris les personnes avec handicap, Téléalarme pour ascenseurs, la sécurité fonctionnelle des systèmes électriques, électroniques et électroniques programmables, Sécurité des machines, conception des chaînes de sécurité basée sur la redondance systématique, etc.

II.9. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de dresser un panorama complet et structuré du fonctionnement d'un système automatisé d'ascenseur moderne, en adoptant une approche fonctionnelle et descriptive. L'analyse systémique du système a révélé la complexité des interactions entre les trois sous-systèmes fondamentaux : la partie opérative (mécanique et électromécanique), la partie commande (contrôle-commande par API et variateur de fréquence), et la partie relation (interface homme-machine).

Nous avons décrit en détail les technologies de motorisation, en soulignant la transition majeure des machines à réducteur vers les machines gearless à moteur synchrone à aimants permanents, qui a permis l'émergence des ascenseurs sans local de machines. Les systèmes de mesure (codeurs absolus et incrémentaux) et de sécurité (parachute, limiteur de vitesse, chaîne de sécurité câblée, freinage double) ont été présentés dans leur contexte fonctionnel. Le cycle de fonctionnement nominal a été décrit phase par phase, de l'appel à la fermeture des portes, en passant par les différents modes de fonctionnement (normal, inspection, pompier, secours).

Enfin, l'examen du cadre normatif (EN 81-20/50, IEC 61508, EN ISO 13849) (voir annexe 01) a mis en évidence les exigences rigoureuses de sécurité fonctionnelle applicables aux ascenseurs, avec la nécessité d'architectures redondantes et de niveaux de performance SIL/PL adaptés à la criticité de chaque fonction de sécurité.

CHAPITRE III

Présentation d'ascenseur et de l'automate Twido

Chapitre III

Présentation d'ascenseur et de l'automate Twido

III.1 Introduction

Le présent chapitre constitue le pivot central de ce mémoire. Son objectif est de présenter les deux éléments matériels sur lesquels repose notre travail pratique : d'une part, le monte-charge à trois niveaux de la société Micro-tech Lab, qui constitue notre procédé à piloter (à simuler) ; d'autre part, l'automate programmable Twido de Schneider Electric, qui assure la commande de ce processus. Ces deux dispositifs forment le couple système de commande / partie opérative que nous avons étudié théoriquement précédemment.

Nous commencerons par décrire le monte-charge didactique, ses caractéristiques techniques, sa façade de commande et l'ensemble de ses composants. Nous présenterons ensuite l'automate Twido dans ses aspects matériels (entrées/sorties, alimentation, mémoire) et logiciels (langages de programmation, TwidoSuite).

III.2 Présentation du monte-charge à trois niveaux

III.2.1 Contexte pédagogique et domaines d'application

Le monte-charge à trois niveaux (fig. III.1) est un dispositif didactique conçu et commercialisé par la société algérienne SARL Microtechnologies Lab (Micro-tech Lab), dont le siège est à Boumerdes. Il s'agit d'un équipement pédagogique interactif, doté de 21 entrées/sorties tout ou rien (TOR), conçu pour l'apprentissage et la démonstration de l'automatisme industriel.

Il offre une plateforme pédagogique permettant aux apprenants d'expérimenter avec différentes configurations d'automates programmables industriels (API) dans des conditions proches de la réalité industrielle.[33]

Figure III.1 : Vue d'ensemble du système didactique du monte-charge à trois niveaux

[34].



Ce dispositif est utilisé dans plusieurs domaines d'enseignement et d'application :

- Conduite des systèmes automatisés par LADDER via API ou PC avec logiciel de supervision ;
- Informatique industrielle et programmation de systèmes séquentiels ;
- Commande en assembleur ou en langage évolué d'un procédé séquentiel ;
- Électronique et automatisme industriel en travaux pratiques de laboratoire.

Une caractéristique remarquable de cet équipement est sa flexibilité d'interfaçage : il est compatible avec toute plage d'API dont les entrées/sorties fonctionnent entre 5 et 24 VDC, avec la possibilité de connecter le point commun au pôle positif (+ commun) ou négatif (– commun) selon les exigences spécifiques de l'automate utilisé. Cette caractéristique le rend compatible avec la quasi-totalité des API du marché, notamment la gamme Twido de Schneider Electric.[33]

III.2.2 Caractéristiques techniques de l'ascenseur didactique

Le tableau III.1 synthétise les principales caractéristiques techniques du monte-charge à trois niveaux tel que documenté dans le manuel technique de Micro-tech Lab et présentés sur les figures III.2 et III.3.

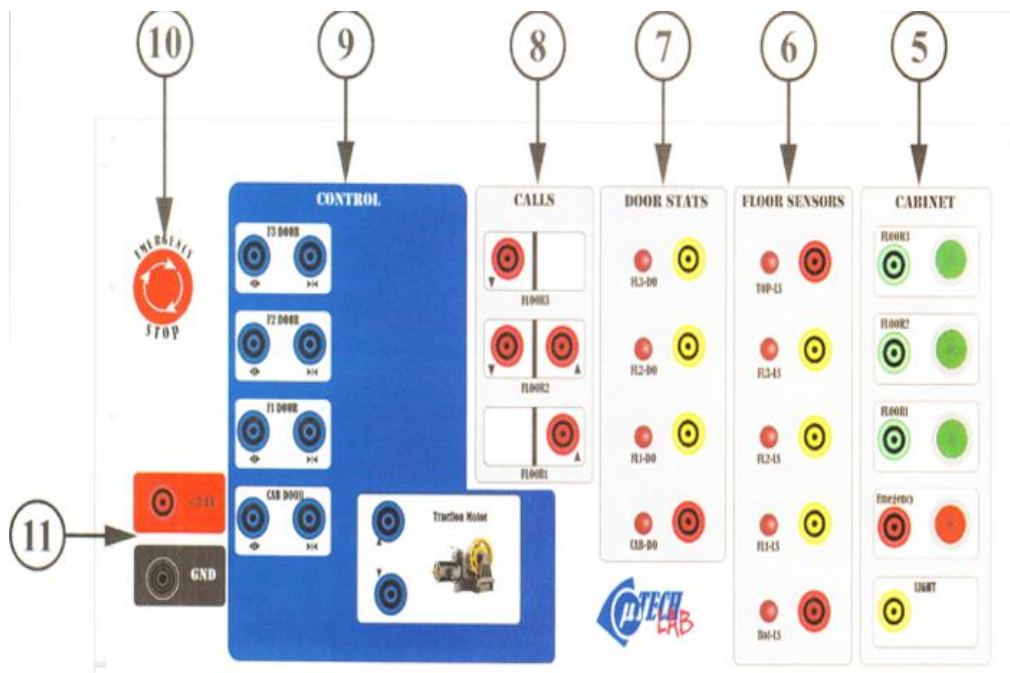


Figure III.2 : Brochage et identification des borniers de connexion (fiches banane 4 mm) sur la façade de commande [34].

Figure III.3 : Détail de la façade de commande et du synoptique du monte-charge [34]

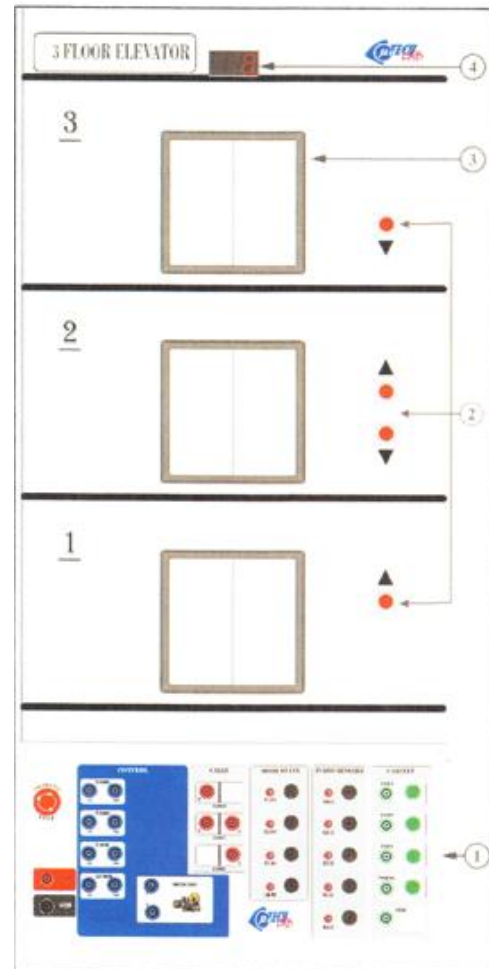


Tableau III.1 : Caractéristiques techniques du monte-charge à trois niveaux [34]

N°	Composant	Description	Détail
①	Façade de commande	Panneau de manipulation général du monte-charge	Boutons, LEDs, blocs de connexion
②	Appel de cabinet	Interrupteur poussoir pour émettre une demande de déplacement vers un étage spécifique	Floor1, Floor2, Floor3, Emergency, Light
③	Portes de monte-charge	Portes qui s'ouvrent automatiquement à l'arrivée de la cabine à chaque niveau	3 portes (une par étage)

N°	Composant	Description	Détail
④	Afficheur à 7 segments	Affichage numérique du niveau de l'étage actuel	Situé en haut de la façade
⑤	Block cabinet	5 fiches banane 4 mm pour commandes cabine	Floor1 à Floor3, Emergency, Light
⑥	Capteur d'étages	5 fiches banane 4 mm pour repérage de position cabine avec LED de signalisation	FL1-LS à FL3-LS, Bot-LS, Top-LS
⑦	L'état de porte	4 fiches banane 4 mm pour détection état des portes (ouverte/fermée) avec LED	FL1-DO à FL3-DO, CAP-DO
⑧	Blocks appel cabinet	4 fiches banane 4 mm appariées avec boutons-poussoirs d'appel cabine vers automate	Appels paliers N°2
⑨	Block contrôle	5 paires de fiches banane 4 mm pour commande manuelle des portes et du moteur	F1–F3 Door, CAB Door, Traffic Motor
⑩	Bouton d'urgence	Arrêt d'urgence — interruption instantanée de l'alimentation en cas de situation critique	Bouton rouge type coup de poing
⑪	Sortie +24V et GND	Fiche banane de sortie +24V et masse pour alimentation externe si nécessaire	Sortie d'alimentation

III.2.3 Détail des blocs fonctionnels (fig. III.2)

a. Block cabinet (zone ⑤)

Ce bloc comprend cinq fiches banane de 4 mm, chacune associée à un bouton-poussoir spécifique de la cabine. Les fiches Floor1 à Floor3 permettent de sélectionner l'étage de destination en appuyant sur le bouton-poussoir correspondant. La fiche Emergency est utilisée en cas de panne survenue dans la cabine, tandis que la fiche Light commande l'éclairage intérieur de la cabine.

b. Capteur d'étages (zone ⑥)

Ce bloc est équipé de cinq fiches banane de 4 mm destinées au repérage de la position de la cabine dans la gaine. Chaque fiche est associée à une LED de signalisation qui s'active lorsque la cabine se trouve à un emplacement spécifique :

- **FL1-LS à FL3-LS** : la LED s'allume lorsque la cabine atteint l'étage spécifié (détecteurs de niveau) .
- **Bot-LS** : la LED s'allume lorsque la cabine dépasse l'extrémité inférieure de la course (fin de course bas) .
- **Top-LS** : la LED s'allume lorsque la cabine dépasse l'extrémité supérieure de la course (fin de course haut).

c. L'état de porte (zone ⑦)

Ce dispositif est équipé de quatre fiches banane de 4 mm, chacune connectée à une LED de signalisation pour la détection de l'état des portes (ouvertes ou fermées). Les fiches FL1-DO à FL3-DO signalent l'ouverture des portes palières de chaque étage, tandis que la fiche CAP-DO indique l'état de la porte de la cabine.

d. Block contrôle (zone ⑨)

Ce bloc constitue l'interface de commande manuelle du monte-charge. Il comprend cinq paires de fiches banane de 4 mm, chacune ayant un rôle spécifique :

- **F1 Door à F3 Door** : chaque paire est dédiée au contrôle d'une porte palière, avec une connexion pour l'ouverture et une autre pour la fermeture ;
- **CAB Door** : paire dédiée au contrôle de la porte de la cabine, avec connexion ouverture/fermeture ;

- **Traffic Motor** : paire destinée au contrôle du moteur d'élévation, avec une connexion pour la montée et une autre pour la descente de la cabine.

e. Bouton d'urgence (zone ⑩) et sortie +24V (zone ⑪)

Le bouton d'urgence est un élément de sécurité essentiel. En cas de situation critique, son actionnement permet d'interrompre instantanément l'alimentation électrique de l'ensemble du système, assurant ainsi la sécurité des équipements et des utilisateurs. La sortie +24V et GND (fiche banane) permet quant à elle d'alimenter des équipements externes si nécessaire, ce qui est utile lors de l'utilisation d'une interface HMI ou d'un module de communication supplémentaire.[33]

III.3 L'automate programmable Twido (TWDLCAA24DRF)

III.3.1 Présentation générale

L'automate programmable industriel Twido est un produit de la gamme Schneider Electric, conçu pour des applications d'automatisme d'entrée et de milieu de gamme. Dans notre travail de mémoire, nous avons utilisé le modèle TWDLCAA24DRF dont les caractéristiques techniques sont présentées en annexe 02.



Figure III.4 : API Twido [35].

Ce socle didactique présente plusieurs caractéristiques pédagogiques notables. Toutes les entrées et sorties numériques sont directement accessibles via des fiches de sécurité banane, facilitant la connexion à n'importe quelle partie opérative. Un bloc de simulation d'entrées (module TWDXSM14) est connecté en parallèle sur les entrées, permettant de tester un

programme sans connexion à la partie opérative. La sérigraphie du socle indique les références d'adresses de chaque entrée/sortie, et un bloc de visualisation dynamique des entrées/sorties à LEDs permet le suivi en temps réel de l'état du système.[34]



Figure III.5 : Bloc de visualisation [34]

Une alimentation intégrée Phaséo 24 Vdc 3 A (4,2 A en crête) est disponible pour alimenter les actionneurs du procédé, dans la limite des capacités de l'alimentation.

Un connecteur TER (fig. III.6) de type mini-Din constitue l'interface de programmation par câble avec le PC chargé du logiciel TwidoSuite.



Figure III.6 : Connecteur TER et adaptateur de communication série RS-485 [35]

III.3.2 Description des entrées/sorties

L'automate Twido TWDLCAA24DRF dispose de quatorze entrées numériques et dix sorties numériques à relais. Les entrées numériques (%I0.0 à %I0.13) sont alimentées en 24 Vdc et sont adressées via des fiches banane jaunes. Les sorties numériques (%Q0.0 à %Q0.9) sont des contacts secs (dry contacts) à relais, adressées via des fiches banane vertes. Quatre fiches vertes supplémentaires (COM0 à COM3) permettent la connexion des communs des sorties.[34]

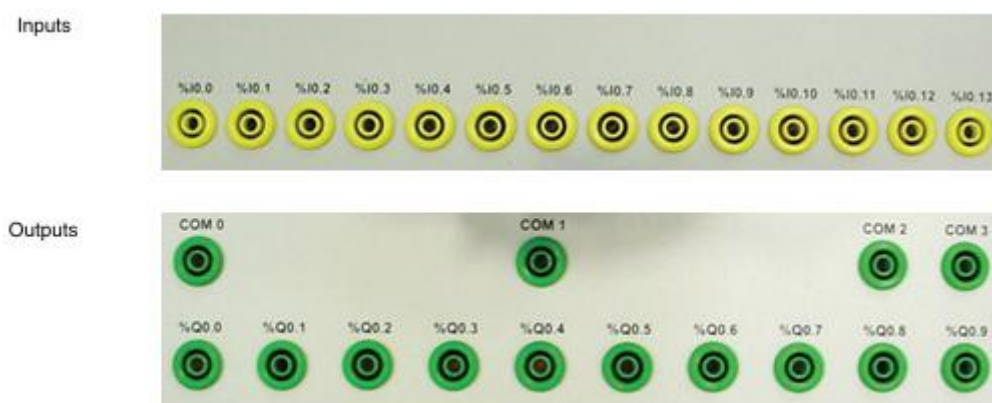


Figure III.7 : Entrées/Sorties de l'automate [35].

III.3.3 Langages de programmation

Le Twido supporte langages de programmation définis par la norme CEI 61131-3, accessibles depuis l'environnement TwidoSuite :

Tableau III.2 : Langages de programmation supportés par le Twido [35]

Langage	Description	Avantages / Usage
IL (Instruction List)	Langage textuel booléen séquentiel - proche du langage assembleur	Adapté aux opérations combinatoires simples ; compact
Ladder (Contacts)	Représentation graphique en schéma de contacts électriques - contacts normalement ouverts/fermés et bobines	Intuitif pour les électriciens ; standard IEC 61131-3
GRAFCET (SFC)	Outil de modélisation séquentielle par étapes et transitions - utilisé comme méthode de conception, puis traduit en Ladder pour l'implémentation sous TwidoSuite	Idéal pour l'analyse des processus séquentiels ; doit être traduit en Ladder avant implémentation dans TwidoSuite

III.3.4 Logiciel TwidoSuite et cycle de l'automate

Le logiciel **TwidoSuite** est l'environnement de développement intégré (IDE) dédié à la programmation des automates Twido. Il fonctionne sous Windows et offre les fonctionnalités suivantes :

- Création et édition de programmes en Ladder et IL avec interface graphique.
- Transfert du programme de l'ordinateur vers l'automate via le câble mini-Din.
- Mode simulation : test du programme sans connexion à la partie opérative, en utilisant le module simulateur TWDXSM14.
- Mode mise au point (debug) : animation du programme, forçage de variables, surveillance des états en temps réel.
- Configuration des variables, des blocs fonctionnels (temporisateurs, compteurs, comparateurs) et des paramètres système.

Le cycle d'exécution de l'automate Twido suit le modèle standard de l'automatique industrielle. À chaque cycle, l'automate effectue séquentiellement les opérations suivantes : lecture de l'état des entrées physiques et stockage en mémoire image des entrées ; exécution du programme utilisateur (traitement des instructions du réseau 0 jusqu'au dernier réseau) ; écriture des sorties physiques depuis la mémoire image des sorties. Ce cycle se répète indéfiniment tant que l'automate est en mode RUN. La capacité mémoire de 3 000 instructions est largement suffisante pour le programme de gestion du monte-charge à trois niveaux.[34]

III.4. Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter en détail les deux équipements qui constituent le cœur de notre travail pratique : le monte-charge à trois niveaux de Micro-tech Lab et l'automate programmable Twido TWDLCAA24DRF de Schneider Electric.

Le monte-charge didactique offre une représentation complète d'un système automatisé réel avec ses 28 entrées/sorties TOR, sa flexibilité d'interfaçage (5 à 24 VDC, point commun au + ou au -), ses composants bien identifiés (capteurs de position, d'état de porte, actionneurs de portes et de traction) et son interface pédagogique intuitive par fiches banane. Il constitue un procédé séquentiel dont le comportement illustre parfaitement les concepts étudiés précédemment.

L'automate Twido se distingue par sa compacité, sa robustesse et sa complétude pour les applications pédagogiques : 14 entrées et 10 sorties à relais, mémoire de 3 000 instructions, support des langages IL et Ladder, alimentation intégrée et logiciel TwidoSuite dédié. Ses caractéristiques techniques répondent pleinement aux exigences d'interconnexion avec le monte-charge.

Fort de ces éléments descriptifs et de l'analyse fonctionnelle réalisée précédemment, le chapitre suivant sera consacré à la présentation de l'environnement de développement TwidoSuite ainsi qu'aux principes fondamentaux du langage Ladder utilisé pour la programmation de l'automate Twido. Il abordera également les différentes étapes de développement, de test et de simulation du programme de commande.

CHAPITRE IV

Programmation et Simulation

Chapitre IV

Programmation et simulation

IV.1 Introduction

Après avoir achevé les travaux préalables portant sur l'analyse du système et la reconnaissance de ses composants matériels et immatériels, nous nous concentrons à présent sur la réalisation du système de commande de l'ascenseur. On y trouve un exposé des différentes étapes par lesquelles passe le développement du logiciel de contrôle, en commençant par la mise en place de l'environnement informatique et des interfaces d'entrée/sortie du contrôleur industriel, jusqu'à la conception de l'algorithme de commande et sa vérification au moyen de simulations numériques. Cette approche nous offre la possibilité de contrôler si le système mis au point répond bien aux spécifications fonctionnelles établies préalablement et de tester comment il se comporte dans une variété de situations réelles d'exploitation.

IV.2 Présentation du logiciel TwidoSuit V2.0

IV.2.1 Présentation générale

TwidoSuite est l'environnement de développement intégré (IDE — Integrated Development Environment) édité par Schneider Electric (anciennement Telemecanique) pour la programmation, la configuration et la mise au point des automates de la gamme Twido [35]. La version V2.0, datée de septembre 2007 (référence documentaire 35011385), est l'évolution majeure du logiciel ayant introduit une interface utilisateur entièrement graphique organisée autour d'un flux de travail par étapes applicatives (Application Steps) [35].

Le logiciel est compatible avec les systèmes d'exploitation Windows 2000, XP et Vista SP1, et requiert au minimum un processeur Pentium 466 MHz, 128 Mo de mémoire vive et 100 Mo d'espace disque. Il prend en charge l'ensemble des automates Twido, qu'il s'agisse des bases compactes (à laquelle appartient le TWDLCDA24DRF) ou des bases modulaires.

IV.2.2 Modes de fonctionnement

TwidoSuite propose deux modes de fonctionnement principaux accessibles via le lanceur d'applications [35] :

a) **Programming Mode (Mode programmation)** : C'est le mode principal d'utilisation, dans lequel s'effectue l'intégralité du cycle de développement : conception, écriture, compilation, simulation, transfert et mise au point.

b) **Monitoring Mode (Mode surveillance)** : Utilitaire distinct dédié à la surveillance bas niveau et à la maintenance matérielle. Il permet la consultation de l'état mémoire de l'automate, le réglage de l'horloge temps réel (RTC), la consultation des statistiques Ethernet, la configuration de modem (TD-33/V90) et la surveillance du temps de cycle (minimum, courant, maximum) ainsi que du chien de garde (Watchdog) [5].

Une troisième fonctionnalité utilitaire, accessible séparément, est le PLC Firmware Update, permettant la mise à jour du système d'exploitation embarqué de l'automate [35].



Figure IV.1 : Fenêtre d'accueil Twido - Modes de fonctionnement [35].

IV.2.3 Architecture de l'interface barre d'étapes application

L'interface de TwidoSuite est structurée autour d'une barre d'étapes applicatives (Application Steps bar) située en haut de la fenêtre principale, qui guide l'utilisateur à travers les quatre phases successives d'un projet d'automatisme [35] :

1. **Project (Projet)** : Phase de gestion du projet. Elle permet la création, l'ouverture et l'édition d'un projet, ainsi que la saisie des métadonnées : nom du projet (jusqu'à 36 caractères), nom de l'auteur, département, version et commentaires généraux. Cette étape

permet également d'attacher une image de garde au format BMP qui apparaîtra sur le rapport final.

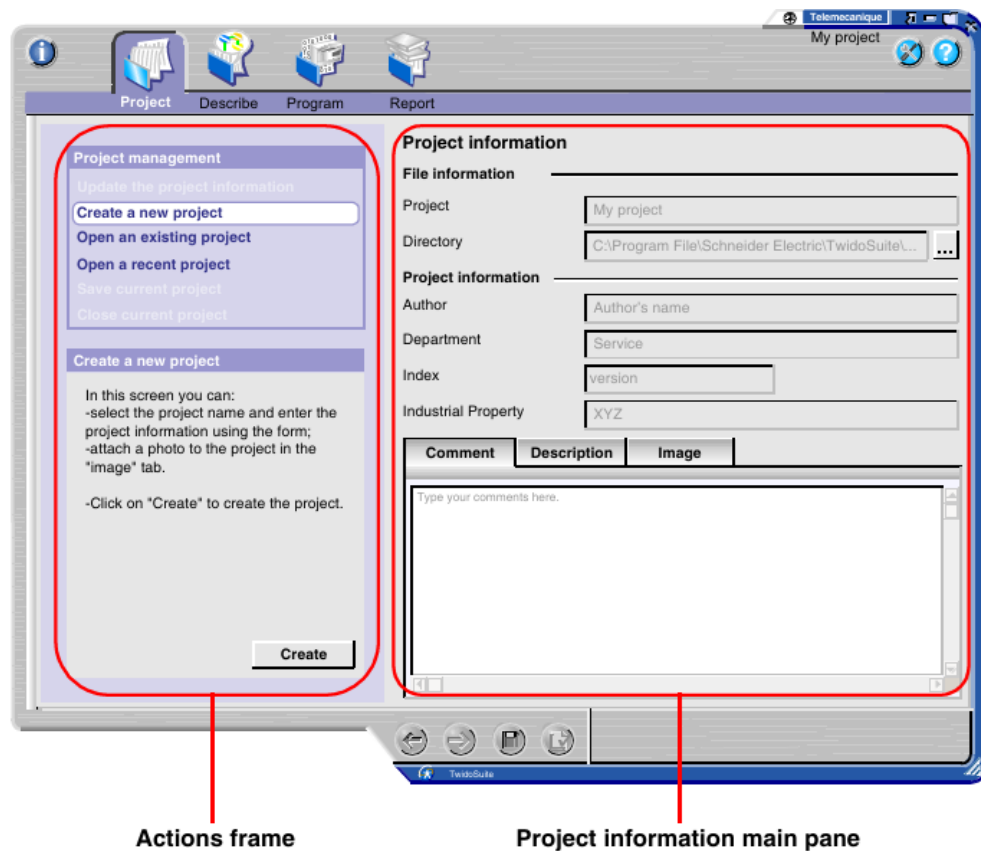


Figure IV.2 : Fenêtre création de projet [35].

2. **Describe (Décrire)** : Phase de configuration matérielle. Sur un panneau graphique (Graphic Pane), l'utilisateur glisse-dépose les composants matériels depuis un catalogue de produits (Product Catalog) : automate de base, modules d'extension d'E/S, options (horloge temps réel RTC, modules de communication). C'est à cette étape que le modèle TWDLCA24DRF est sélectionné comme automate cible de notre projet (voir fig. IV.3). La nomenclature matérielle peut être exportée au format CSV [35].

3. **Program (Programmer)** : Étape centrale du développement, elle-même décomposée en trois sous-étapes accessibles via une barre spécifique :

- **Configure (Configurer)** : paramétrage des ressources matérielles (entrées/sorties, modules analogiques, AS-Interface, CANopen) et logicielles (bits mémoire %M, mots mémoire %MW, blocs fonction comme les temporisateurs %TM et compteurs %C, blocs programmeurs Schedule Blocks).

- **Program (Programmer)** : accès à l'éditeur de programme en langage Ladder (graphique) ou List (textuel), avec réversibilité entre les deux représentations. Cette sous-étape inclut l'éditeur de symboles pour nommer les variables.
 - **Debug (Débuguer)** : gestion de la connexion entre le PC et l'automate, transfert du programme, tables d'animation, et lancement du Twido Simulator pour la validation logicielle.
4. **Report (Rapport)** : Phase de documentation finale. Génération de rapports personnalisés au format imprimable ou HTML, incluant la configuration matérielle, le code Ladder, les commentaires et les références croisées [35].

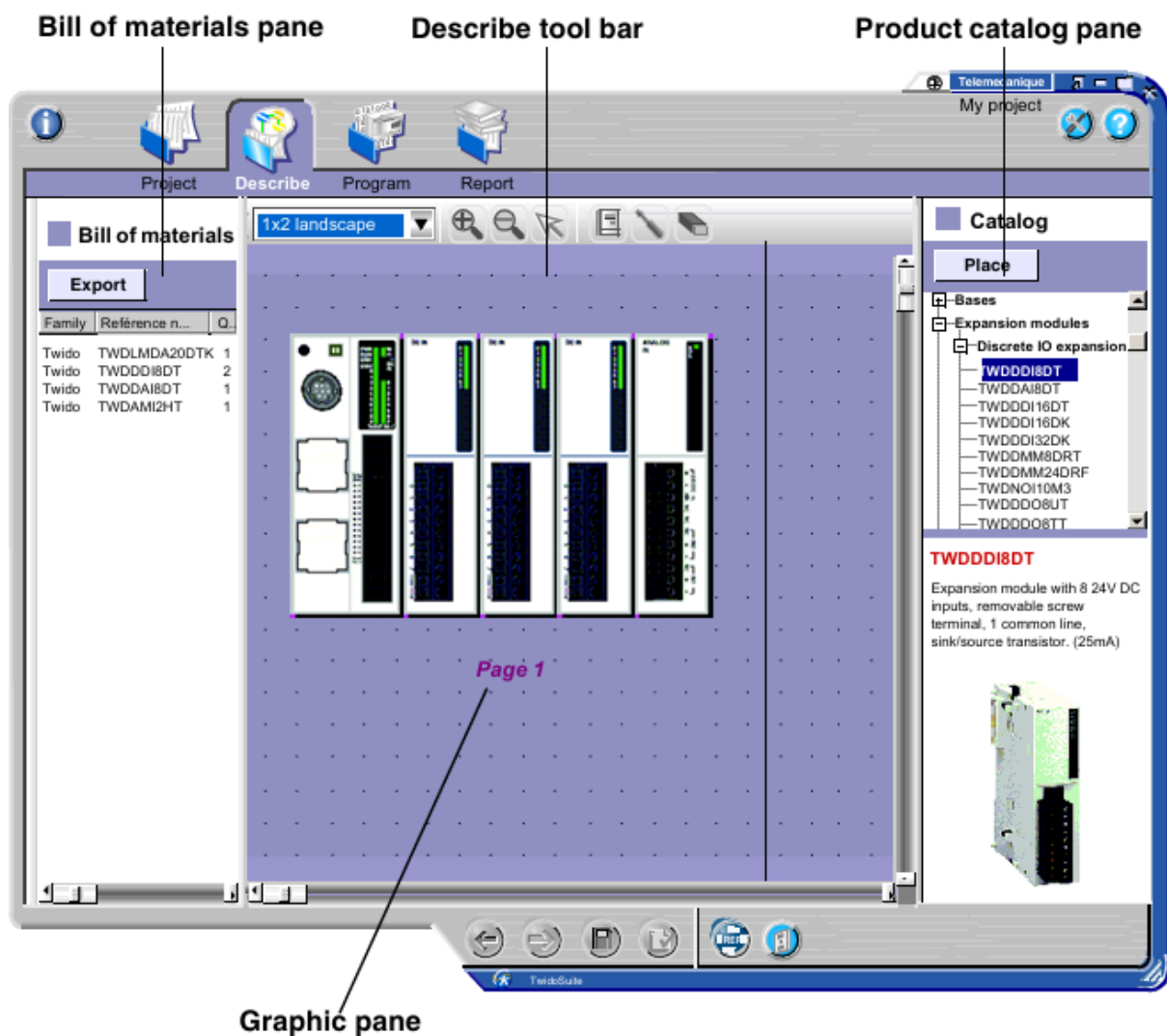


Figure IV.3 : Fenêtre de description des composants – Bibliothèque de composants [35].

IV.2.4 Fonctionnalités principales du logiciel

TwidoSuite V2.0 offre l'ensemble des fonctionnalités attendues d'un IDE industriel moderne :

- Programmation multi langage : Ladder (LD) et List (IL) avec conversion bidirectionnelle automatique.
- Éditeur graphique de description matérielle par glisser-déposer.
- Configuration des blocs fonction : temporisateurs %TM, compteurs %C, registres LIFO/FIFO, blocs PID, Schedule Blocks.
- Symbolisation des variables (attribution de noms explicites aux adresses %I, %Q, %M, %MW).
- Analyse syntaxique du programme avant transfert (vérification de la validité de chaque réseau).
- Twido Simulator : simulateur logiciel intégré permettant la validation du programme sans automate physique.
- Tables d'animation (Animation Tables) : visualisation et forçage des variables en temps réel.
- Animation du programme : rétroéclairage du code Ladder en cours d'exécution.
- Transfert vers l'automate via câble série RS-485, USB, Ethernet ou modem.
- Mise à jour du firmware via l'utilitaire Exécutive Loader Wizard.
- Génération de rapports au format HTML ou imprimable.

IV.3 Définition du langage Ladder (LD)

IV.3.1 Présentation du langage

Le principe du langage Ladder repose sur l'analogie avec un circuit électrique alimenté entre deux barres verticales, appelées barres de potentiel ou power rails. La barre de gauche représente la phase (alimentation), tandis que la barre de droite représente le neutre. Entre ces deux barres s'établissent des liaisons horizontales appelées réseaux (rungs en anglais, littéralement « barreaux d'échelle », d'où le nom Ladder — « échelle »). Chaque réseau comporte une combinaison logique de contacts (à gauche) qui détermine l'activation d'une ou plusieurs bobines (à droite). Le programme est exécuté par l'automate de manière cyclique, en parcourant les réseaux de haut en bas et de gauche à droite [36].

IV.3.2 Elément de base du langage

Le langage Ladder de TwidoSuite met à la disposition du programmeur les éléments graphiques suivants, regroupés dans la Palette Ladder [36] :

- a) **Contacts** : Représentent les conditions logiques. Ils peuvent être combinés en série (équivalent ET logique) ou en parallèle (équivalent OU logique) :

Tableau IV.1 : Présentation des contacts en langage ladder [35].

Symbole	Désignation	Fonction logique
—| |—	Contact normalement ouvert (NO)	Passant si la variable =1
—|/|—	Contact normalement fermé (NC)	Passant si la variable =0
—| P |—	Contact a front montant	Passant un cycle lors de 0→1
—| N |—	Contact a front descendant	Passant un cycle lors de 1→0

- b) **Bobines** : Représentent les sorties (variables résultantes). Elles sont toujours placées sur le côté droit du réseau, juste avant la barre de potentiel droite :

Tableau IV.2 : Présentation des bobines en langage ladder [35].

Symbole	Désignation	Action
—()—	Bobine normale (direct)	Variable = état de la ligne
—(/)—	Bobine inversée	Variable = complément de la ligne
—(S)—	Bobine SET	Met la variable a 1 (méorisé)
—(R)—	Bobine RESET	Met la variable a 0 (méorisé)

c) **Blocs fonction** : Représentent des fonctions complexes paramétrables :

- **Temporisateurs (%TM)** : Trois types principaux sont disponibles dans le système Twido [3, 4] :
 - TON (Timer On Delay) : temporisation à l'enclenchement.
 - TOF (Timer Off Delay) : temporisation au déclenchement.
 - TP (Timer Pulse) : impulsion calibrée.

Chaque temporisateur est paramétré par sa base de temps (Time Base : 1 ms, 10 ms, 100 ms, 1 s, ou 1 min) et sa valeur de présélection (Preset value, de 0 à 9999).

- **Compteurs (%C)** : compteurs/décompteurs sur 16 bits.
- Blocs de comparaison : comparaison entre deux opérandes (=, <, >, ≤, ≥, ≠).
- Blocs opération : opérations arithmétiques et logiques sur les mots %MW.

d) **Éléments graphiques de connexion** : Lignes horizontales et verticales pour relier les éléments entre eux.

IV.3.3 Règles fondamentales de programmation

Plusieurs règles strictes régissent l'écriture d'un programme Ladder valide sous TwidoSuite [35] :

- Tout réseau valide doit se terminer par une bobine ou un bloc opération, jamais par un contact seul ;
- Une variable de sortie (%Q, %M) ne doit en principe être commandée que par une seule bobine directe dans tout le programme (sauf pour les bobines SET/RESET qui peuvent être multiples sur la même variable) ;
- L'analyse syntaxique doit être effectuée avant tout transfert ou simulation ;
- Les adresses physiques suivent le format normalisé : %I0.x pour les entrées TOR de l'automate de base, %Q0.x pour les sorties, %M pour les bits mémoire internes, %MW pour les mots mémoire 16 bits, %TM pour les temporisateurs, %C pour les compteurs [35, 36].

IV.4 Affectation des Entrées/Sorties

L'affectation des E/S a été établie sur la base du cahier du banc didactique MICROTECHNOLOGIES LAB [1]. Elle est synthétisée dans les tableaux IV.3 et IV.4 :

Tableau IV.3 : Affectation des entrées TOR sur Twido TWDLCDA24DRF.

Adresse	Symbole	Désignation fonctionnelle	Type
%I0.0	FL0-LS	Capteur de position étage 0	NO
%I0.1	FL1-LS	Capteur de position étage 1	NO
%I0.2	FL2-LS	Capteur de position étage 2	NO
%I0.3	BOT-LS	Fin de course bas	NC
%I0.4	TOP-LS	Fin de course haut	NC
% I0.5	CAB-DO	Porte cabine	NO
% I0.6	FL0-DO	Détecteur port palier étage 0	NO
% I0.7	FL1-DO	Détecteur port palier étage 1	NO
% I0.8	FL2-DO	Détecteur port palier étage 2	NO
% I0.9	CALL-F0	Bouton d'appel étage 0	NO
%I0.10	CALL-F1	Bouton d'appel étage 1	NO
%I0.11	CALL-F2	Bouton d'appel étage 2	NO
%I0.12	OVERLOD	Détecteur de surcharge	NC
%I0.13	EMERGENCY	Bouton d'urgence	NC

Tableau IV.4 : Affectation des sorties relais sur Twido TWDLCDA24DRF

Adresse	Symbole	Désignation fonctionnelle	Charge
%Q0.0	MOT-UP	Commande moteur traction — sens montée	Bobine contacteur
%Q0.1	MOT-DN	Commande moteur traction — sens descente	Bobine contacteur
%Q0.2	CAB-OP	Commande ouverture porte cabine	Moteur de porte
%Q0.3	CAB-CL	Commande fermeture porte cabine	Moteur de porte
%Q0.4	DR0-OP	Commande ouverture porte palière — Niveau 0	Moteur de porte
%Q0.5	DR1-OP	Commande ouverture porte palière — Niveau 1	Moteur de porte
%Q0.6	DR2-OP	Commande ouverture porte palière — Niveau 2	Moteur de porte
%Q0.7	LED-N0	Voyant lumineux — appel Niveau 0 enregistré	LED de signalisation
%Q0.8	LED-N1	Voyant lumineux — appel Niveau 1 enregistré	LED de signalisation
%Q0.9	Détecteur surcharge	Voyant lumineux — surcharge	LED de signalisation

Au-delà des E/S physiques, le programme exploite plusieurs bits mémoire internes (%M) et temporisateurs (%TM) pour assurer la mémorisation des états et la gestion temporelle. Ces variables qu'on appelle variables internes sont récapitulées sur le tableau IV.5.

Tableau IV.5 : Variable internes du programme sur Twido

Adresse	Symbole	Rôle fonctionnement
%M0	REQ-N0	Mémorisation (latch) de l'appel au niveau 0 — Set/Reset
%M1	REQ-N1	Mémorisation (latch) de l'appel au niveau 1 — Set/Reset
%M2	REQ-N2	Mémorisation (latch) de l'appel au niveau 2 — Set/Reset
%M3	MOVING	Bit informatif : cabine en mouvement (%Q0.0 ou %Q0.1 actif)
%M5	DIR-UP	Sens de déplacement : 1 = montée, 0 = descente — latché par Set/Reset
%M10	SAFE	Bit maître de sécurité : 1 si urgence non pressée (%I0.13=1)
%M20/21/22	T-LATCH	Verrous de déclenchement des temporisateurs N0/N1/N2
%M30/31/32	DUMMY	Bobines auxiliaires (requis par TwidoSuite pour valider les blocs timer)
%TM0/1/2	T-DRx	Temporisateurs portes N0/N1/N2 : TON, TB = 1s, Preset = 10 → 10 secondes
%S13	FIRST-SCAN	Bit système Twido : à 1 uniquement lors du premier cycle d'exécution

IV.5 Organigramme de fonctionnement du système

Avant de procéder à l'écriture du code Ladder, il est indispensable de formaliser le comportement souhaité du système sous la forme d'un organigramme de fonctionnement. Cet outil algorithmique permet de décrire, de manière non ambiguë et indépendante de tout langage de programmation, le cycle opérationnel complet de l'ascenseur, les décisions conditionnelles qui gouvernent les transitions entre états, et les mécanismes de sécurité.

L'organigramme de la Figure IV.4 décrit le cycle complet, depuis la mise sous tension jusqu'au retour à l'état de repos, en passant par toutes les phases opérationnelles : mémorisation des appels, calcul du sens de déplacement, mise en mouvement, détection d'arrivée, ouverture des portes, temporisation de maintien et fermeture des portes. Une branche de sécurité, active en parallèle de toutes les étapes, gère l'arrêt d'urgence.

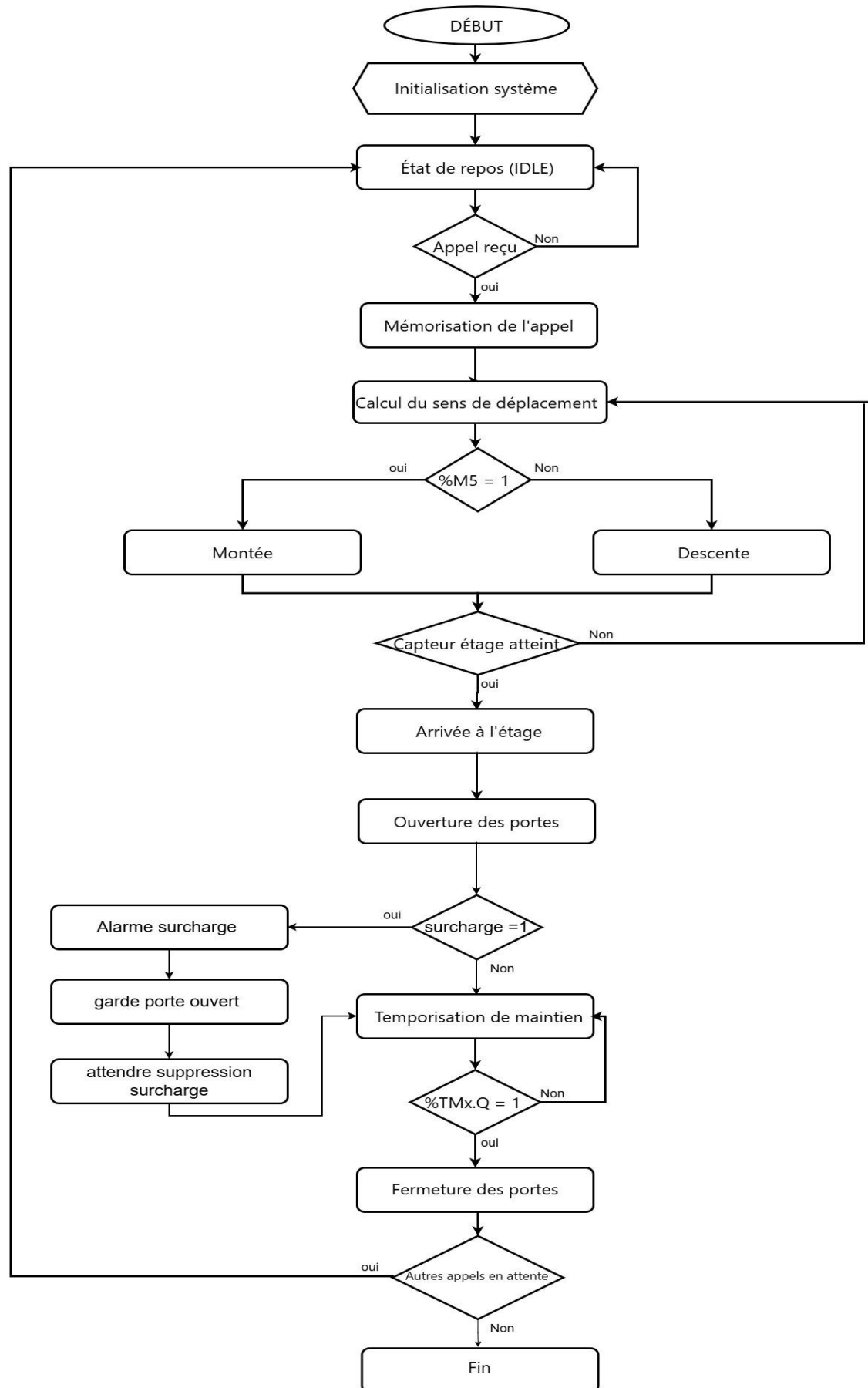


Figure IV.4 : Organigramme complet de fonctionnement de l'ascenseur.

Description des différentes étapes de l'organigramme

Initialisation système : Au premier cycle d'exécution de l'automate, le bit système %S13 est exploité pour forcer les sorties moteur %Q0.0 et %Q0.1 à 0, garantissant un état initial sûr avant toute évaluation des autres réseaux.

État de repos (IDLE) : La cabine est immobile à un niveau quelconque, les portes sont fermées et les moteurs sont à l'arrêt. Le programme scrute en permanence les boutons d'appel %I0.9, %I0.10 et %I0.11. Tant qu'aucun appel n'est détecté et qu'aucune demande n'est en mémoire (%M0 = %M1 = %M2 = 0), le système demeure dans cet état de repos.

Mémorisation de l'appel : Dès qu'un bouton d'appel est détecté, le bit de demande correspondant est mémorisé par une bobine Set : %M0 pour le niveau 0, %M1 pour le niveau 1, %M2 pour le niveau 2. Une condition NC sur le capteur de l'étage correspondant empêche la mémorisation si la cabine est déjà présente à l'étage demandé. La LED de signalisation associée s'allume simultanément. La mémorisation est persistante (indépendante de l'état du bouton après relâchement) grâce au mécanisme d'auto-maintien Set/Reset. Cette architecture permet la gestion des appels multiples : si un second appel arrive pendant un trajet, il est mémorisé et traité automatiquement.

Calcul du sens de déplacement : Le programme détermine le sens de déplacement en comparant la position actuelle de la cabine, lue sur les capteurs %I0.0/%I0.1/%I0.2, avec les bits de demande %M0/%M1/%M2. Si la destination est au-dessus de la position actuelle, le bit %M5 est mis à 1 (montée) par une bobine Set. Dans le cas contraire, %M5 est mis à 0 (descente) par une bobine Reset. Le bit %M5 est latché et conserve sa valeur pendant toute la durée du déplacement, même lorsque la cabine quitte les capteurs d'étage et que %I0.x repasse à 0.

Déplacement montée / descente : Le moteur sens montée %Q0.0 est activé par bobine Set si et seulement les conditions sont simultanément satisfaites : bit maître actif (%M10=1), au moins une demande en attente, sens calculé à monter (%M5=1), moteur de descente inactif (/ %Q0.1 - verrouillage croisé anti-court-circuit), l'absence de surcharge (%I0.12 = 0), fin de course haute non atteinte (/ %I0.4) et porte cabine fermée (/ %I0.5). La descente %Q0.1 est commandée symétriquement. La cabine se déplace jusqu'à l'activation du capteur de l'étage demandé. Un appel intermédiaire enregistré pendant le trajet provoque automatiquement un arrêt à cet étage.

Capteur étage atteint ?: Le système surveille en continu le capteur de position de l'étage demandé. Tant que celui-ci n'est pas activé, la cabine poursuit son déplacement.

Étape Arrivée à l'étage : Le capteur d'étage confirme l'arrivée ; les moteurs sont arrêtés et la demande correspondante est effacée.

Étape Ouverture des portes : Les portes palière et cabine s'ouvrent simultanément dès l'arrivée à l'étage.

Décision surcharge = 1 ?: Après ouverture des portes, le système teste l'état du détecteur de surcharge %I0.12. Si une surcharge est détectée :

- Alarme surcharge : la sortie %Q0.9 est activée, allumant la signalisation de surcharge sur le panneau de commande.
- Garde porte ouvert : aucune temporisation n'est engagée, les portes restent ouvertes aussi longtemps que la condition de surcharge persiste.
- Attendre suppression surcharge : le système reste dans cette boucle d'attente, réévaluant %I0.12 à chaque cycle, jusqu'à ce que la charge redescende sous le seuil ($\%I0.12 = 0$).

Dès que la surcharge disparaît, le système rejoint directement l'étape Temporisation de maintien, sans repasser par une nouvelle ouverture de porte, la porte étant restée ouverte durant toute la période de surcharge.

Temporisation de maintien (absence de surcharge) : Si aucune surcharge n'est détectée, le temporisateur (%TM0/%TM1/%TM2) est démarré pour une durée de 10 secondes (TON, base 1s, preset 10).

%TMx.Q = 1 ?: Tant que la temporisation n'est pas écoulée, le système reste en attente. Une fois le délai atteint, la fermeture des portes est déclenchée.

Etapes Fermeture des portes : À la fin de la temporisation (%TM.Q = 1), les portes palière et cabine sont refermées par bobines Rese, Le signal de fermeture cabine %Q0.3 est activé .

Autres appels en attente ?: Si d'autres demandes sont en attente ($\%M0 + \%M1 + \%M2 = 1$), le système repart directement vers le calcul du sens pour le prochain déplacement. sinon, le cycle se termine et le système retourne en IDLE.

IV.6 Programme Ladder complet sous TwidoSuite

IV.6.1 Architecture générale du programme

Le programme est organisé en 8 groupes fonctionnels contenant 50 réseaux au total (R00 à R49), structurés dans une section principale unique. Cette organisation modulaire, matérialisée dans TwidoSuite par des bandeaux de titre de réseau (Network Titles), facilite la lecture, le débogage et la maintenance du code.

Tableau IV.6 : Organisation du programme en groupes fonctionnels

Groupe	Réseaux	Nb. Échelons	Fonction
Groupe 0	R00 – R04	5	Initialisation et sécurité
Groupe 1	R05 – R07	3	Mémorisation (latch) des appels par étage
Groupe 2	R08 – R010	3	Calcul du sens de déplacement (%M5)
Groupe 3	R11 – R12	2	Commande des moteurs montée/descente
Groupe 4	R13 – R27	15	Détection d'arrivée et ouverture des portes
Groupe 5	R28 – R45	18	Temporisations 10 s et fermeture des portes
Groupe 6	R46	1	Bit informatif de cabine en mouvement (%M3)
Groupe 7	R27 – R49	3	Signalisation LED des appels en attente

IV.6.2 Convention de notation

Le programme est présenté ci-après en notation textuelle normalisée, utilisée tout au long de ce mémoire. Les conventions adoptées sont les suivantes : [%Ix.y] désigne un contact normalement ouvert (NO) ; [/ %Ix.y] un contact normalement fermé (NC) ; (%Mx) une bobine normale ; (S) %Mx une bobine Set ; (R) %Mx une bobine Reset ; [%TMx IN] le bloc

fonctionnel timer. Le symbole (+) représente une branche parallèle (OU logique) et (-) une connexion en série (ET logique). Les commentaires sont indiqués en italique.

IV.6.3 Code Ladder complet

- Groupe 0 initialisation et sécurité

Initialisation au premier scan - force l'arrêt du moteur sens montée pour éviter tout démarrage intempestif au démarrage de l'automate.

```
R00 : [%S13] ————— (R)%Q0.0
```

Initialisation au premier scan - force l'arrêt du moteur sens descente pour éviter tout démarrage intempestif au démarrage de l'automate.

```
R01 : [%S13] ————— (R)%Q0.1
```

Sécurité arrêt d'urgence - coupe immédiatement les deux moteurs (montée/descente) si %M10=0, indépendamment de l'état des autres conditions. Garantit l'arrêt instantané de la cabine.

```
R02 : [/ %M10] ————— (R)%Q0.0
```

```
R03 : [/ %M10] ————— (R)%Q0.1
```

Bit maître du système - %M10=1 tant que l'arrêt d'urgence n'est pas activé. Toutes les actions du programme dépendent de ce bit.

```
R04 : [/ %I0.13] ————— (%M10)
```

- Groupe 1 Mémorisation des appels par étage

Mémorisation de l'appel étage N0 - active %M0 si le bouton d'appel N0 est pressé (ou déjà mémorisé) et que la cabine n'est pas déjà au niveau N0.

```
R05 : [%M10] — [%I0.9 + %M0] — [%I0.0] — (S)%M0
```

Mémorisation de l'appel étage N1 - active %M1 si le bouton d'appel N1 est pressé (ou déjà mémorisé) et que la cabine n'est pas déjà au niveau N1.

```
R06 : [%M10] — [%I0.10 + %M1] — [%I0.1] — (S)%M1
```

Mémorisation de l'appel étage N2 - active %M2 si le bouton d'appel N2 est pressé (ou déjà mémorisé) et que la cabine n'est pas déjà au niveau N2.

$$R07 : [\%M10] \text{---} [\%I0.11 + \%M2] \text{---} [/ \%I0.2] \text{---} (S)\%M2$$

- Groupe 2 Calcule du sens de déplacement

Détermine le sens MONTÉE (%M5=1) lorsqu'une demande concerne un étage supérieur à la position actuelle de la cabine. Reste actif (latché) durant tout le trajet, même si la cabine quitte les capteurs d'étage.

$$R08 : [\%M10] \text{---} [\%M1 \cdot \%I0.0 + \%M2 \cdot \%I0.0 + \%M2 \cdot \%I0.1] \text{---} (S)\%M5$$

Force le sens DESCENTE (%M5=0) lorsqu'une demande concerne un étage inférieur à la position actuelle de la cabine.

$$R09 : [\%M10] \text{---} [\%M0 \cdot \%I0.1 + \%M0 \cdot \%I0.2 + \%M1 \cdot \%I0.2] \text{---} (R)\%M5$$

Réinitialise le sens de déplacement (%M5=0) dès que la cabine atteint sa destination (montée terminée).

$$R010 : [\%I0.1 \cdot \%M1 + \%I0.2 \cdot \%M2] \text{---} (R)\%M5$$

Groupe 3 Commande des moteurs montée/décente

Démarre le moteur sens MONTÉE si : une demande est en attente, ET le sens calculé est montée, ET le moteur sens descente est inactif, ET la cabine n'a pas atteint la fin de course haute, ET la porte de la cabine est fermée, et aucune surcharge n'est détectée par le capteur de surcharge.

$$R11 : [\%M10] \text{---} [\%M0 + \%M1 + \%M2] \text{---} [\%M5] \text{---} [/ \%Q0.1] \text{---} [/ \%I0.4] \text{---} [/ \%I0.5] \text{---} [/ \%I0.12] \text{---} (S)\%Q0.0$$

Démarre le moteur sens DESCENTE si : une demande est en attente, ET le sens calculé est descente, ET le moteur sens montée est inactif, ET la cabine n'a pas atteint la fin de course basse, ET la porte de la cabine est fermée, et aucune surcharge n'est détectée par le capteur de surcharge.

$$R12 : [\%M10] \text{---} [\%M0 + \%M1 + \%M2] \text{---} [/ \%M5] \text{---} [/ \%Q0.0] \text{---} [/ \%I0.3] \text{---} [/ \%I0.5] \text{---} [/ \%I0.12] \text{---} (S)\%Q0.1$$

Groupe 4 Détection d'arrivée et ouverture des ports

Séquence d'arrivée à l'étage N0 - dans l'ordre : ouverture porte palière N0 et porte cabine (Set), puis arrêt des moteurs et effacement de la demande (Reset). L'ordre Set-avant-Reset garantit que les portes s'ouvrent avant l'effacement de %M0.

Arrivée	Niveau	0
R13 : [%M10]—[%I0.0]—[%M0] — (S)%Q0.4		
R14 : [%M10]—[%I0.0]—[%M0] — (S)%Q0.2		
R15 : [%M10]—[%I0.0]—[%M0] — (R)%Q0.0		
R16 : [%M10]—[%I0.0]—[%M0] — (R)%Q0.1		
R17 : [%M10]—[%I0.0]—[%M0] — (R)%M0		

Séquence d'arrivée à l'étage N1 - ouverture porte palière N1 et porte cabine (Set, en premier), puis arrêt des moteurs et effacement de la demande %M1 (Reset, en dernier). Permet de traverser N1 sans s'arrêter si %M1=0, et de s'arrêter correctement si %M1=1 même en cas d'appel reçu en cours de trajet.

Arrivée	Niveau	1
R18 : [%M10]—[%I0.1]—[%M1] — (S)%Q0.5		
R19 : [%M10]—[%I0.1]—[%M1] — (S)%Q0.2		
R20 : [%M10]—[%I0.1]—[%M1] — (R)%Q0.0		
R21 : [%M10]—[%I0.1]—[%M1] — (R)%Q0.1		
R22 : [%M10]—[%I0.1]—[%M1] — (R)%M1		

Séquence d'arrivée à l'étage N2 - ouverture porte palière N2 et porte cabine (Set, en premier), puis arrêt des moteurs et effacement de la demande %M2 (Reset, en dernier).

Arrivée	Niveau	2
R23 : [%M10]—[%I0.2]—[%M2] — (S)%Q0.6		
R24 : [%M10]—[%I0.2]—[%M2] — (S)%Q0.2		
R25 : [%M10]—[%I0.2]—[%M2] — (R)%Q0.0		

R26 : [%M10]—[%I0.2]—[%M2] — (R)%Q0.1

R27 : [%M10]—[%I0.2]—[%M2] — (R)%M2

Groupe 5 Temporisations et fermeture des portes

Active le verrou de temporisation N0 dès que la porte palière N0 est ouverte.



Démarre le temporisateur TM0 (10 secondes, TON, preset=10, base 1s) tant que le verrou %M20 est actif. %M30 est une bobine factice requise par TwidoSuite pour valider le bloc fonction.

R29 : [%M10]—[%M20] — [%I0.12] — [%TM0 IN]—Q — (M30)

Lorsque la temporisation est écoulée, libère le verrou %M20 (doit être évalué en premier pour ne pas bloquer les rungs suivants).

R30 : [%M10]—[%M20] — [%TM0.Q] ————— (R)%M20

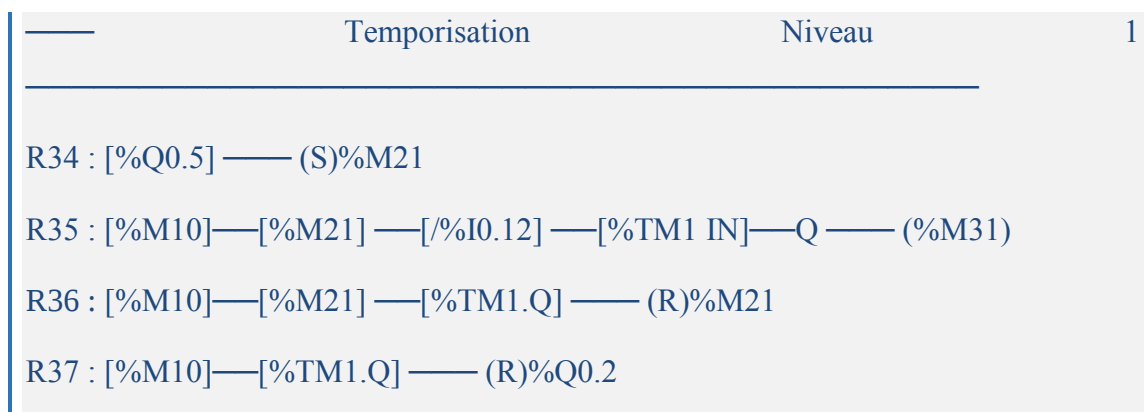
Fin de temporisation N0 - ferme la porte cabine, ferme la porte palière N0, et active le signal de fermeture cabine.

R31 : [%M10]—[%TM0.Q] ————— (R)%Q0.2

R32 : [%M10]—[%TM0.Q] ————— (R)%Q0.4

R33 : [%M10]—[%TM0.Q] ————— (S)%Q0.3

Identique à la séquence N0, appliquée à la porte palière N1 et au temporisateur TM1.



```
R38 : [%M10]—[%TM1.Q] — (R)%Q0.5
```

```
R39 : [%M10]—[%TM1.Q] — (S)%Q0.3
```

Identique à la séquence N0, appliquée à la porte palière N2 et au temporisateur TM2.

	Temporisation	Niveau	2
R40 : [%Q0.6] — (S)%M22			
R41 : [%M10]—[%M22]—[%I0.12] —[%TM2 IN]—Q — (%M32)			
R42 : [%M10]—[%M22] —[%TM2.Q] — (R)%M22			
R43 : [%M10]—[%TM2.Q] — (R)%Q0.2			
R44 : [%M10]—[%TM2.Q] — (R)%Q0.6			
R45 : [%M10]—[%TM2.Q] — (S)%Q0.3			

Groupe 6 Cabine en mouvement

Bit informatif indiquant que la cabine est en mouvement. %M3=1 si le moteur sens montée OU le moteur sens descente est actif.

```
R46 : [%Q0.0 + %Q0.1] ————— (%M3)
```

Groupe 7 signalisation LED

Allume la LED correspondante (Q0.7/Q0.8) tant qu'une demande d'étage est mémorisée (N0/N1)

```
R47 : [%M0] ————— (%Q0.7)
```

```
R48 : [%M1] ————— (%Q0.8)
```

allumée tant que %I0.12 est actif.

```
R49 : [%I0.12] ————— (%Q0.9)
```

IV.7 Simulation du programme

La simulation est lancée depuis l'étape Program en cliquant sur le bouton Twido Simulator (icône représentant un automate marqué « S ») dans la barre d'accès rapide [3]. À l'activation du simulateur, TwidoSuite bascule automatiquement dans le mode Debug > Animate : la fenêtre d'aperçu (Overview) s'ouvre, ainsi que le tableau de bord (Dashboard), et le programme commence son exécution virtuelle.

Le test qu'on va décrire ci-dessous est relatif à **Appel simple de la cabine : montée du niveau 0 vers le niveau 1**, il a pour objectif de vérifier le fonctionnement normal du système dans le cas d'un appel unique, sans surcharge ni intervention extérieure.

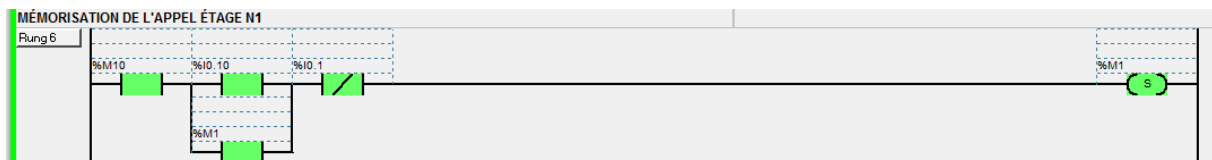
La cabine est initialement positionnée au niveau 0, avec les portes fermées et le système à l'état de repos (%M10 = 1, %Q0.0 = 0 et %Q0.1 = 0).

Conditions initiales

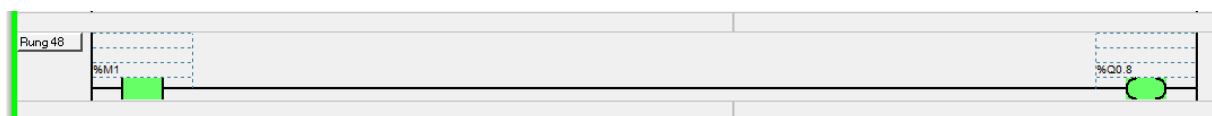
- Cabine au niveau 0.
- Portes cabine et palière fermées.
- Aucun appel en attente.
- Aucun défaut ni surcharge détectée.
- Système en mode repos.

Déroulement du test

L'appel est simulé depuis le palier du niveau 1 en forçant l'entrée %I0.10 à l'état logique 1, puis en la relâchant. Cette action active le réseau R06, qui mémorise la demande à l'aide de la bobine Set (%M1 = 1). Simultanément, le réseau R48 allume le voyant de prise en compte de l'appel (%Q0.8 = 1).



Visualisation LED



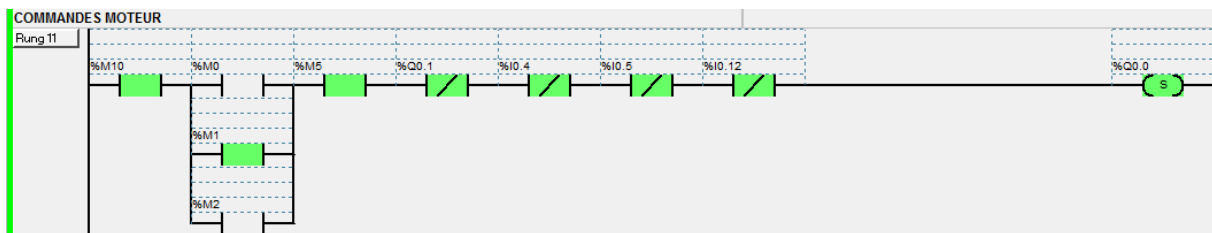
Le calcul du sens de déplacement est ensuite assuré par le réseau R08. Comme l'étage demandé (N1) est supérieur à la position actuelle de la cabine (N0), le bit %M5 est positionné à 1, indiquant un déplacement en montée.



Avant d'autoriser le mouvement, le réseau R11 vérifie l'ensemble des conditions de sécurité suivantes :

- Système actif.
- Présence d'une demande mémorisée.
- Sens de déplacement = montée.
- Moteur sens descente inactif.
- Fin de course haute non atteinte.
- Porte cabine correctement fermée.
- Absence de surcharge.

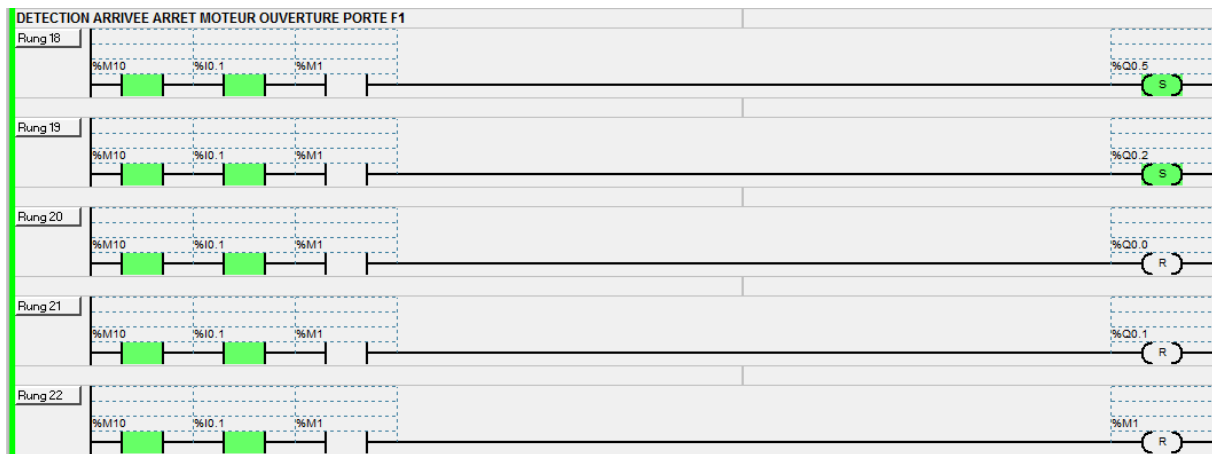
Après validation de ces conditions, la sortie %Q0.0 est activée.



Déplacement de la cabine

La cabine quitte alors le niveau 0, ce qui provoque la désactivation du capteur correspondant (%I0.0 = 0). Le déplacement se poursuit normalement et le sens de montée reste maintenu grâce au verrouillage du bit %M5 par bobine Set.

Lorsque la cabine atteint le niveau 1, le capteur d'étage correspondant devient actif (%I0.1 = 1). Cette détection déclenche automatiquement la séquence d'arrivée gérée par les réseaux R18 à R22.



Séquence d'arrivée

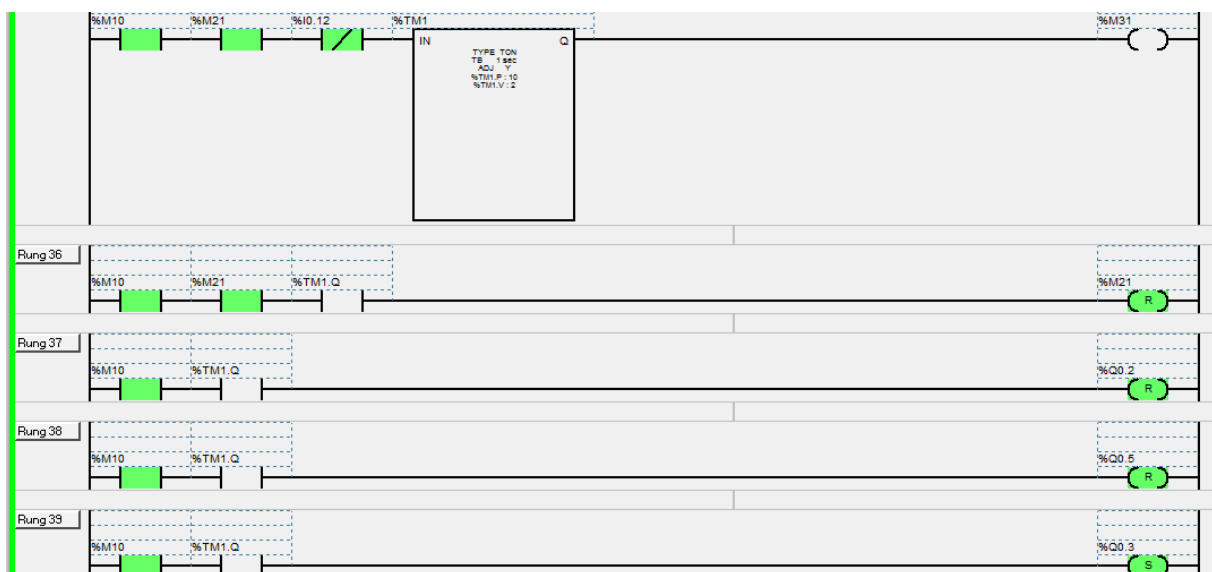
Les actions suivantes sont exécutées :

- Arrêt du moteur sens montée (%Q0.0 = 0).
- Ouverture de la porte palière (%Q0.5 = 1).
- Ouverture de la porte cabine (%Q0.2 = 1).
- Effacement de la demande (%M1 = 0).

L'ordre d'exécution est particulièrement important. Les commandes d'ouverture des portes sont traitées avant l'effacement de la demande afin de garantir le bon déclenchement de la séquence d'accès à l'étage.

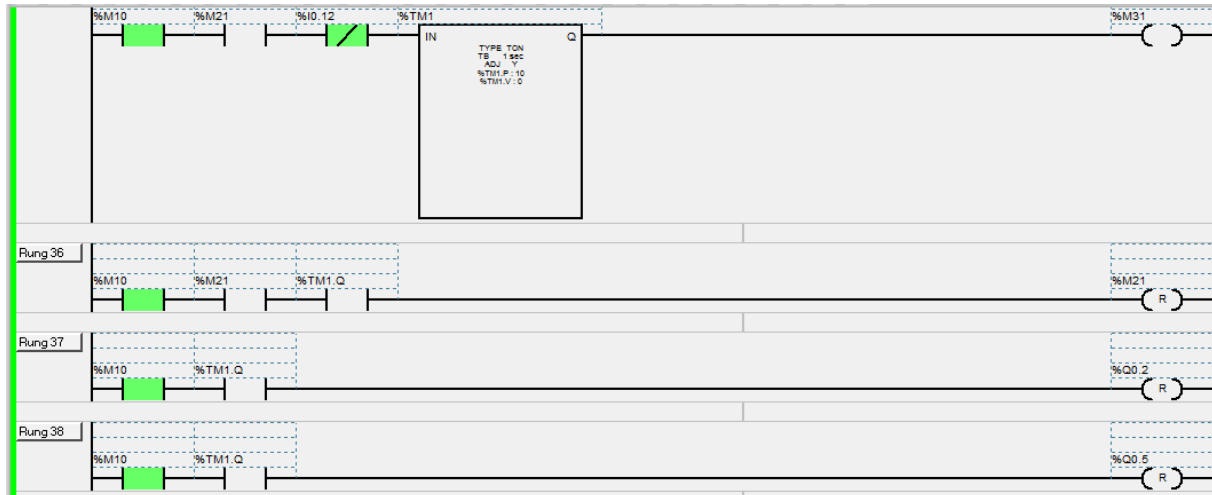
Temporisation et fermeture des portes

Après l'ouverture complète des portes, le réseau R29 active le bit de verrouillage %M21, ce qui lance le temporisateur %TM1 configuré en mode TON avec une durée de 10 secondes.



À l'expiration de cette temporisation :

- %TM1.Q passe à 1.
- Les portes cabine et palière se ferment (%Q0.2 = 0 et %Q0.5 = 0).
- Le signal de fermeture de la cabine (%Q0.3 = 1) est activé.



Résultat obtenu

L'ensemble des étapes observées lors de la simulation sous TwidoSuite correspond aux résultats attendus. Le système a correctement :

- Pris en compte l'appel.
- Calculé le sens de déplacement ;
- Assuré le déplacement vers l'étage demandé ;
- Exécuté la séquence d'arrivée ;
- Géré l'ouverture puis la fermeture temporisée des portes.

Ce test valide ainsi le fonctionnement nominal du système et confirme la conformité du programme avec les exigences définies dans le cahier des charges.

IV.8 Conclusion

Cette phase nous a permis de concrétiser et de vérifier le pilotage d'un ascenseur pédagogique par simulation en recourant à l'automate Twido TWDLCDA24DRF associé à la suite logicielle TwidoSuite. Une fois les entrées et sorties définies et l'organigramme élaboré, nous avons développé le programme en langage Ladder avant de le valider par voie de simulation. Par ailleurs, cette démarche nous a fait découvrir des spécificités intrinsèques à la plateforme

Twido, notamment le recours aux bobines Set/Reset, la criticité de la séquence d'exécution des réseaux, ainsi que les particularités liées aux temporisateurs et à la mise en place initiale du dispositif.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Le présent mémoire de fin d'études a été consacré à l'étude, à la conception et à la simulation de la commande automatisée d'un ascenseur à trois étages à l'aide d'un automate programmable industriel.

Dans un premier temps, l'étude des généralités et de l'évolution historique des ascenseurs a permis de comprendre l'importance de ces systèmes dans le développement des infrastructures modernes ainsi que les principales technologies qui ont marqué leur évolution. Cette analyse a mis en évidence le rôle essentiel de l'automatisation dans l'amélioration des performances, de la sécurité et du confort des utilisateurs.

L'étude du fonctionnement des ascenseurs modernes a ensuite permis d'identifier les différents sous-systèmes intervenant dans leur exploitation, notamment la motorisation, les capteurs, les dispositifs de sécurité et les systèmes de commande. L'analyse des normes de sécurité applicables a également souligné l'importance d'une conception rigoureuse garantissant la protection des usagers et la fiabilité de l'installation.

La partie pratique du travail a porté sur l'exploitation du banc didactique MICROTECHNOLOGIES LAB ainsi que sur l'utilisation de l'automate Schneider Electric Twido TWDLCDA24DRF et du logiciel TwidoSuite V2.0. Cette étape a permis d'établir l'architecture de commande du système et de concevoir un programme en langage Ladder répondant au cahier des charges défini.

Le développement du programme de commande a constitué l'élément central de cette étude. La structure mise en place assure la gestion des appels, le déplacement de la cabine entre les différents niveaux, l'ouverture et la fermeture des portes ainsi que la prise en compte des dispositifs de sécurité.

Au-delà des résultats techniques, ce travail nous a permis de consolider nos connaissances en automatisation industrielle, en programmation des automates programmables, en modélisation des systèmes séquentiels et en méthodologie de conception. Il a également mis en évidence l'importance de la rigueur dans l'analyse, le développement et la validation des systèmes automatisés destinés à des applications où la sécurité est un critère primordial.

Toutefois, certaines limites doivent être signalées. La validation du programme a été réalisée principalement par simulation, sans mise en service complète sur le système réel. De plus, certaines fonctionnalités avancées présentes dans les ascenseurs modernes, telles que la gestion optimisée du trafic, la supervision à distance ou l'optimisation énergétique, n'ont pas été intégrées dans le cadre de ce projet.

Dans cette perspective, plusieurs pistes d'amélioration peuvent être envisagées. Parmi celles-ci figurent le transfert du programme sur le banc didactique pour une validation expérimentale complète, l'intégration d'une interface homme-machine de supervision, l'ajout de fonctions de communication industrielle ainsi que l'extension du système à un nombre plus important d'étages. Ces évolutions permettraient d'accroître le réalisme et les performances de la solution développée.

En conclusion, les objectifs fixés au début de ce mémoire ont été atteints. Cette étude a permis de mettre en œuvre les connaissances acquises au cours du cursus de Master tout en développant une application concrète dans le domaine de l'automatisation industrielle. Elle constitue une expérience particulièrement enrichissante, tant sur le plan scientifique que technique, et représente une base solide pour de futurs travaux dans le domaine des systèmes automatisés de transport vertical.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Fortune Business Insights. (2025). Taille du marché des ascenseurs et escaliers mécaniques — Rapport mondial. <https://www.fortunebusinessinsights.com/fr/industry-reports/elevator-and-escalator-market-100301>
- [2] Strakosch, G. R. & Caporale, R. S. (Eds.). (2010). The Vertical Transportation Handbook, 4e édition. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons. ISBN: 978-0-470-91973-6. DOI : 10.1002/9780470949818.
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470949818>
- [3] Boufafa, M. K. (2019). Étude de principe de fonctionnement d'un ascenseur. Mémoire de Master, Département de Génie Mécanique, Université Badji Mokhtar — Annaba, Algérie. Directeur : Boussaid Ouzine. <https://biblio.univ-annaba.dz/ingeniorat/wp-content/uploads/2019/09/Boufafa-Mustapha-Kamel.pdf>
- [4] De Jong, J. (2019). Vertical Transportation: The Past 50 and Next 50 Years of Development. In : Jason Gabel and Daniel Safarik (Eds.), CTBUH (Council on Tall Buildings and Urban Habitat). https://global.ctbuh.org/resources/papers/4255-DeJong_2019_Vertical%20Transportation.pdf
- [5] Jetter, M. & Gerstenmeyer, S. (2015). A Next Generation Vertical Transportation System. CTBUH Proceedings: The Future of Tall. <https://global.ctbuh.org/resources/papers/2408-Jetter.pdf>
- [6] Hassani, A. (2018). Automatisation d'un ascenseur par un API. Mémoire de Master, UMMTO. <https://dspace.ummto.dz/server/api/core/bitstreams/526f1149-5b37-4c6e-b2e9-e0cb352e04da/content>
- [7] Albahaisi, H. S. M. & Fernane, F. (2025). Programmation et commande d'un ascenseur à 3 étages par mise en œuvre de l'automate Siemens S7-300. Mémoire de Master, Université de Guelma. https://dspace.univ-guelma.dz/jspui/bitstream/123456789/17913/1/F1_6_ALBAHAISI_Hamza%20shaher%20mahmoud_1752671349.pdf
- [8] Boulénache, A. & Houache, D. (2017). Automatisation des processus industriels par l'API. Mémoire de Master, Université de Ghardaïa. <https://dspace.univ-ghardaia.edu.dz/server/api/core/bitstreams/0c81493d-1c96-45d2-b858-d24d3a31bdd9/content>
- [9] Ghalem, A. E. (s.d.). Commande d'un ascenseur didactique par un API Schneider M340. Mémoire de Master, Université de Biskra. http://archives.univ-biskra.dz/bitstream/123456789/11140/1/Commande_d%E2%80%99un_ascenseur_didactique_Par_un_API_Schneider.pdf
- [10] Otis Elevator Company. Histoire d'Otis - Origines des ascenseurs.
<https://www.otis.com/fr/fr/our-company/history>
- [11] Schindler Suisse. Accéder à l'ascenseur moderne en 15 étages (blog).

- <https://www.schindler.ch/fr/medias/blog/acceder-a-l-ascenseur-moderne-en-15-etages.html>
- [12] Histoire et Civilisations. (s.d.). 1852 : l'ascenseur moderne, sommet de la technologie. National Geographic / Le Monde.
<https://www.histoire-et-civilisations.com/thematiques/epoque-contemporaine/1852-lascenseur-moderne-sommet-de-la-technologie-88014.php>
- [13] Encyclopædia Britannica. Elisha Otis — Safety Brake, Elevator Design & Industrial Revolution. <https://www.britannica.com/biography/Elisha-Otis>
- [14] Hidral France. (2023). Les ascenseurs les plus rapides du monde. <https://www.hidral.fr/actualites/les-ascenseurs-les-plus-rapides-du-monde>
- [15] EnergiePlus (Architecture et Climat — UCLouvain). Types d'ascenseurs. <https://energieplus-lesite.be/techniques/ascenseurs7/types-d-ascenseurs/> [16] PFB S.r.l. (Italie). Comment fonctionne le limiteur de vitesse pour ascenseurs ?. <https://pfb.it/fr/news/325627/comment-fonctionne-le-limiteur-de-vitesse>
- [17] Nona Elevator (Chine). Explication détaillée du système de guidage d'ascenseur. <https://www.nonaelevator.com/fr/news/detailed-explanation-of-elevator-guide-system/>
- [18] La Tour Eiffel — Site officiel. Les ascenseurs de la tour. https://www.ela-aisbl.eu/wp-content/uploads/2024/11/Safety_of_Existing_Lift_SNEL_application_2020_VF.pdf
- [19] Siemens AG. (2023). SIMATIC S7-1200 Programmable Controller - System Manual. Siemens. <https://cache.industry.siemens.com/>
- [20] Schneider Electric. (2024). Altivar Process ATV930/ATV950 - Variable Frequency Drives. Schneider Electric. <https://www.se.com/>
- [21] Bucher Hydraulics / Elevator World. (2010). Variable-Frequency Drive Systems for Hydraulic Elevators. Elevator World Magazine. <https://elevatorbooks.com/>
- [22] IP, J. (2025). PLC-Based Elevator Control System: A Comprehensive Project Guide. Industrial Monitor Direct. <https://industrialmonitordirect.com/>
- [23] TK Elevator. (2024). What is a Gearless Traction Elevator. TK Elevator Insights. <https://www.tkelevator.com/>
- [24] KONE Corporation. (2023). KONE MonoSpace® - The Machine-Room-Less Elevator. Brochure technique. https://www.kone.fi/Images/brochure-kone-s-monospace_tcm36-18330.pdf
- [25] PFB S.r.l. (2024). Comment fonctionne le parachute pour ascenseurs. PFB. <https://pfb.it/fr/news/325810/comment-fonctionne-le-parachute>
- [26] HEIDENHAIN. (2024). Codeurs pour les ascenseurs. HEIDENHAIN Suisse. <https://www.heidenhain.ch/fr/secteurs-et-applications/ascenseurs>
- [27] Avire Global. (2023). Barrières infrarouges d'ascenseur - Panachrome+. <https://www.avire-global.com/>
-

- [28] SDIS 69 / JSP Lyon-Rochat. (2022). Cadre opérationnel - Interventions sur les ascenseurs. <http://jsp-lyonrochat.com/>
- [29] Barney, G. C. & Al-Sharif, L. (2016). Elevator Traffic Handbook. 2nd Edition, Routledge.
- [30] ISO 13849-1:2015. Safety of Machinery - Safety-related Parts of Control Systems. ISO. <https://www.iso.org/standard/69883.html>
- [31] Liftinstituut. (2016). New Standards EN 81-20 and EN 81-50, Harmonized and Effective. <https://www.liftinstituut.com/>
- [32] EN 81-72:2020. Safety Rules for the Construction and Installation of Lifts - Particular Applications for Passenger and Goods Lifts — Part 72: Firefighters Lifts. Comité Européen de Normalisation (CEN). <https://www.highrisefire.co.uk/docs/prEN81-72.pdf>
- [33] EN 81-70:2018. Safety Rules for the Construction and Installation of Lifts - Particular Applications for Passenger and Goods Lifts -Part 70: Accessibility to Lifts for Persons Including Persons with Disability. CEN. https://www.leia.co.uk/wp-content/uploads/2024/07/QTC-N2424-ELA_Information-Note-EN-81-70.pdf
- [34] MICROTECHNOLOGIES LAB. (s.d.). Manuel technique du Monte-charge à trois niveaux - Banc didactique. Fouès, Boumerdès, Algérie. Documentation interne du laboratoire.
- [35] Schneider Electric. (Septembre 2007). TwidoSuite V2.0 Programming software - Getting started. Référence document : 35011385. Schneider Electric
- [36] <https://yutec.fr/automatisme/programmation-ladder/>

Annexes

Annexe 01

Normes et contraintes de sécurité fonctionnelle

1. Cadre normatif applicable aux ascenseurs

- **EN 81-20 : 2014** (remplaçant EN 81-1:1998) : « Règles de sécurité pour la construction et l'installation des élévateurs — Ascenseurs pour le transport de personnes et de charges ». Cette norme définit les exigences de sécurité globales pour la conception et l'installation, couvrant la résistance mécanique, les espaces de sécurité, l'éclairage, la protection contre les incendies, la protection des portes et l'accessibilité [31].
- **EN 81-50 : 2014** (remplaçant EN 81-2:1998) : « Règles de sécurité pour la construction et l'installation des élévateurs — Examens et essais ». Cette norme définit les protocoles de tests et d'examens pour les composants critiques : parachutes, amortisseurs, limiteurs de vitesse, portes, freins et systèmes de commande. Tous les composants de sécurité doivent être testés et certifiés conformément à cette norme avant leur mise en service [31].
- **EN 81-72 : 2020** : « Ascenseurs pour pompiers ». Définit les exigences spécifiques pour les ascenseurs destinés à être utilisés par les services de secours.
- **EN 81-70 : 2018** : Accessibilité aux ascenseurs pour toutes les personnes y compris les personnes avec handicap ». Définit les exigences d'accessibilité du panneau de commande, des dimensions de cabine et de la signalisation [2].
- **EN 81-28 : 2018** : « Téléalarme pour ascenseurs ». Définit les exigences du système de communication d'urgence bidirectionnel.

2. Exigences SIL (Safety Integrity Level)

La sécurité fonctionnelle des systèmes électriques, électroniques et électromécaniques programmables (E/E/PE) est régie par la norme IEC 61508, dont le concept central est le niveau d'intégrité de sécurité (SIL — Safety Integrity Level). Le SIL définit la probabilité de défaillance dangereuse par heure (PFHd) d'une fonction de sécurité [22, 31] :

Tableau I : Niveaux SIL et probabilité de défaillance dangereuse [30].

Niveau SIL	PFHd (par heure)	Facteur de réduction du risque
SIL 1	$\geq 10^{-6}$ à $< 10^{-5}$	10 à 100

SIL 2	$\geq 10^{-7}$ à $< 10^{-6}$	100 à 1 000
SIL 3	$\geq 10^{-8}$ à $< 10^{-7}$	1 000 à 10 000
SIL 4	$\geq 10^{-9}$ à $< 10^{-8}$	10 000 à 100 000

Pour les ascenseurs, les fonctions de sécurité critiques (arrêt d'urgence, surveillance de survitesse, verrouillage des portes) doivent typiquement atteindre un niveau SIL 2 ou SIL 3 selon la gravité des conséquences potentielles. La norme EN 81-20 renvoie à la norme EN 62061 (application sectorielle de l'IEC 61508 pour les machines) pour la détermination du SIL requis [22, 31].

Les variateurs de fréquence modernes intègrent des fonctions de sécurité certifiées SIL, notamment la fonction STO (Safe Torque Off) conforme à la norme EN 61800-5-2, qui garantit la coupure sûre du couple moteur sans nécessiter de contacteur de puissance externe [20, 21].

3. Catégories de sécurité selon EN ISO 13849

La norme EN ISO 13849-1 « Sécurité des machines — Parties des systèmes de commande relatives à la sécurité » constitue une alternative à l'IEC 62061 pour l'évaluation de la sécurité fonctionnelle des systèmes de commande. Elle définit cinq catégories d'architecture (B, 1, 2, 3, 4) et cinq niveaux de performance (PL a à e) [30] :

Catégorie B : Catégorie de base. Architecture monocanale sans redondance. Les composants doivent résister aux conditions d'utilisation prévues. Une seule défaillance peut entraîner la perte de la fonction de sécurité. Niveau de performance maximal atteignable : PL b [30].

Catégorie 1 : Architecture monocanal avec fiabilité accrue. Les composants doivent être des composants « bien essayés » (well-tried) avec un MTTF_d élevé. Niveau de performance maximal : PL c [24].

Catégorie 2 : Architecture monocanal avec diagnostic. Des tests périodiques automatiques vérifient le bon fonctionnement de la fonction de sécurité. Niveau de performance maximal : PL d [30].

Catégorie 3 : Architecture redondante (deux canaux) avec surveillance croisée. Aucune défaillance unique ne doit entraîner la perte de la fonction de sécurité. La détection de la

défaillance est possible mais pas nécessairement immédiate. Niveau de performance maximal : PL e [30].

Catégorie 4 : Architecture redondante avec exigences de fiabilité renforcées. Les composants doivent avoir un MTTF_d élevé et un taux de couverture de diagnostic $\geq 99\%$. Aucune défaillance unique ni accumulation de défaillances ne doit entraîner la perte de la fonction de sécurité. Niveau de performance : PL e [30].

Tableau II : Correspondance fonctions de sécurité / catégories / PL [30] [31].

Fonction de sécurité	Catégorie minimale	PL requis	Exemple de réalisation
Verrouillage des portes	Cat. 3	PL d	Contacts doublés + surveillance
Arrêt d'urgence	Cat. 3	PL d	Double canal avec surveillance croisée
Surveillance de survitesse	Cat. 3	PL d	Limiteur mécanique + surveillance électronique
Contrôle du frein	Cat. 3	PL d	Frein double avec test indépendant
Protection des portes	Cat. 2	PL c	Rideau lumineux avec autotest
Détection de surcharge	Cat. 1	PL b	Cellule de charge + seuil logiciel

4. Redondance des chaînes de sécurité critique

La combinaison des exigences SIL/PL et des catégories d'architecture conduit à une conception des chaînes de sécurité basée sur la redondance systématique [31, 30] :

- **Chaîne de sécurité câblée (hardware) :** Indépendante de l'API, elle constitue le premier canal de sécurité. L'ouverture de n'importe quel contact de la chaîne coupe directement l'alimentation du contacteur de puissance et applique le frein.
- **Chaîne de sécurité logicielle (software) :** L'API surveille par programme l'état de chaque capteur de sécurité et peut déclencher un arrêt contrôlé via le variateur de fréquence avant même l'intervention de la chaîne hardware.

- **Sécurité intrinsèque mécanique :** Le limiteur de vitesse et le parachute constituent un troisième niveau de protection, entièrement mécanique et indépendant de toute alimentation électrique.

Cette architecture à trois niveaux de protection indépendants (software → hardware → mécanique) assure un niveau de sécurité globale conforme aux exigences les plus strictes des normes en vigueur.

Annexe 02

Caractéristiques techniques du Twido TWDLCAA24DRF [35]

Le tableau III suivant regroupe l'ensemble des caractéristiques techniques du Twido TWDLCAA24DRF telles que spécifiées dans la documentation officielle du constructeur.

Paramètre	Valeur
Référence commerciale	TWDLCAA24DRF
Alimentation	100–240 Vac ($\pm 10\%$)
Fréquence réseau	50/60 Hz $\pm 5\%$
Puissance consommée	30 VA
Courant de court-circuit conventionnel	3 kA
Tension de tenue aux chocs	2,5 kV
Catégorie d'installation	II
Degré de protection aux chocs électriques	I
Entrées numériques	14 entrées 24 Vdc (%I0.0 à %I0.13)
Sorties numériques	10 sorties à relais (%Q0.0 à %Q0.9)
Capacité mémoire programme	3 000 instructions
Carte mémoire EEPROM	32 Ko — référence TWDXCPMFK32
Connecteur de programmation	Connecteur TER (mini-Din)

Paramètre	Valeur
Alimentation 24 Vdc intégrée (Phaséo)	3 A maximum (4,2 A crête)
Simulateur d'entrées	Module TWDXSM14 (14 interrupteurs)
Langages de programmation	IL (liste d'instructions), Ladder (contacts)
Logiciel de programmation	TwidoSuite (version PC)
Communication	Port TER (RS232/RS485 via adaptateur TWDNAC)
Modules optionnels	Affichage diagnostic TWDXCPODC, horodatage TWDXCPRTC
Température d'utilisation	0 °C à +55 °C
Température de stockage	-25 °C à +70 °C
Hygrométrie (fonctionnement)	< 50 % HR à +40 °C
Altitude maximale	2 000 m
Dimensions (H × L × P)	150 × 290 × 310 mm
Masse	3 kg

Résumé :

Ce mémoire présente la conception, la programmation et la simulation de la commande automatisée d'un ascenseur à trois étages. Le travail s'appuie sur un banc didactique réel développé par la société algérienne MICROTECHNOLOGIES LAB, commandé par un Automate Programmable Industriel compact Schneider Electric Twido TWDLCD24DRF disposant de 14 entrées TOR et 10 sorties relais, programmé sous l'environnement de développement TwidoSuite V2.0. Après un historique retraçant l'évolution des systèmes d'élévation depuis l'Antiquité jusqu'aux machines gearless à aimants permanents contemporaines, le mémoire détaille l'architecture fonctionnelle d'un ascenseur automatisé moderne (sous-systèmes mécanique, contrôle-commande et interface homme-machine), les normes internationales applicables et les exigences de sécurité fonctionnelle. La commande est modélisée en langage Ladder. La validation est conduite par simulation à l'aide du Twido Simulator intégré, L'ensemble des résultats observés sont conformes au cahier des charges, démontrant la fiabilité du programme développé.

Mots clés : *Ascenseur automatisé, Automate Programmable Industriel (API) Twido TWDLCD24DRF, TwidoSuite V2.0, langage Ladder, simulation.*

المخلص: تتناول هذه الأطروحة تصميم وبرمجة ومحاكاة نظام التحكم الآلي لمصعد ثلاثي الطوابق. يستند العمل إلى نموذج تجريبي حقيقي طورته شركة MICROTECHNOLOGIES LAB الجزائرية، ويتم التحكم به بواسطة وحدة تحكم منطقية قابلة للبرمجة (PLC) مدمجة من نوع Schneider Electric Twido TWDLCD24DRF، مزودة بـ 14 مدخلاً رقمياً و10 مخارج مرحلية، تمت برمجتها باستخدام بيئة تطوير TwidoSuite V2.0. بعد مقدمة تاريخية تستعرض تطور أنظمة الرفع من العصور القديمة إلى الآلات الحديثة ذات المغناطيس الدائم عديمة التروس، تُفصل الأطروحة البنية الوظيفية لمصعد آلي حديث (الأنظمة الفرعية الميكانيكية، وأنظمة التحكم والقيادة، وواجهة التفاعل بين الإنسان والآلة)، والمعايير الدولية المطبقة، ومتطلبات السلامة الوظيفية. تم تصميم نظام التحكم باستخدام منطق السلم. يتم التحقق من صحة النتائج عن طريق المحاكاة باستخدام برنامج Twido Simulator المدمج. وتتوافق جميع النتائج المرصودة مع المواصفات، مما يدل على موثوقية البرنامج المُطور.

الكلمات المفتاحية: مصعد آلي، وحدة تحكم منطقية قابلة للبرمجة (API) Twido TWDLCD24DRF، TwidoSuite V2.0، لغة Ladder، محاكاة.

Abstract:

This thesis presents the design, programming, and simulation of the automated control of a three-story elevator. The work is based on a real educational bench developed by the Algerian company MICROTECHNOLOGIES LAB, controlled by a Schneider Electric Twido TWDLCD24DRF compact Programmable Logic Controller (PLC) with 14 digital inputs and 10 relay outputs, programmed using the TwidoSuite V2.0 development environment. After a historical introduction tracing the evolution of lifting systems from Antiquity to contemporary gearless permanent magnet machines, the thesis details the functional architecture of a modern automated elevator (mechanical subsystems, control and command systems, and human-machine interface), the applicable international standards, and the functional safety requirements. The control system is modeled using Ladder logic. Validation is performed by simulation using the integrated Twido Simulator. All observed results conform to the specifications, demonstrating the reliability of the developed program.

Keywords: *Automated elevator, Programmable Logic Controller (PLC), Twido TWDLCD24DRF, TwidoSuite V2.0, Ladder language, simulation.*