

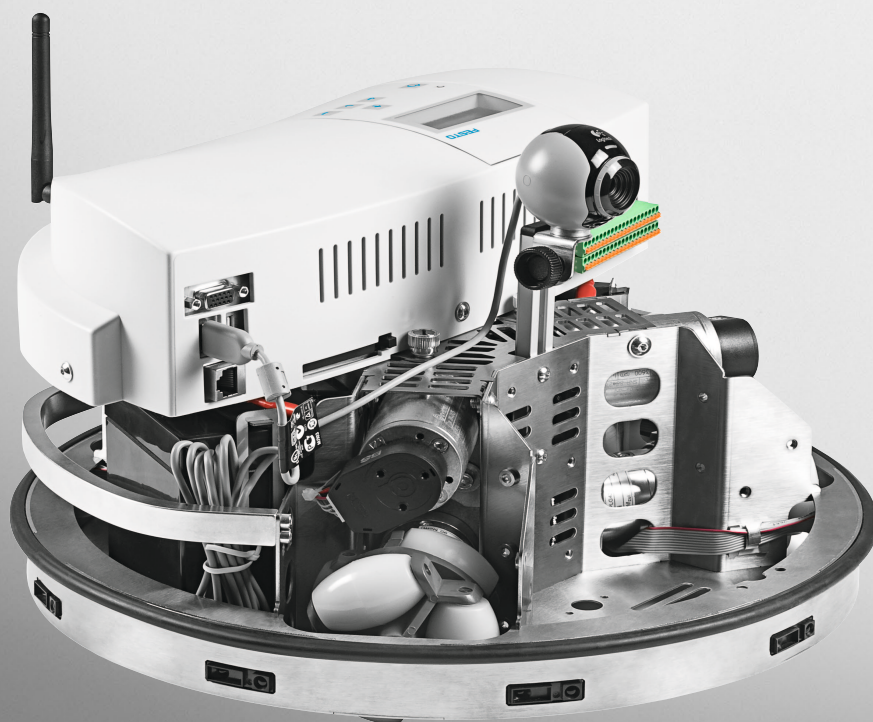
# Robotino<sup>®</sup>

## FESTO

Livre d'exercices



Avec CD-ROM



Festo Didactic  
548607 fr

## Utilisation conforme

Le système robotique mobile Robotino® est exclusivement destiné à la formation initiale et continue dans le domaine de l'automatisation et de la technique. Il incombe à l'établissement de formation et/ou aux formateurs de faire respecter par les étudiants les consignes de sécurité décrites dans les manuels accompagnant la station.

Festo Didactic décline par conséquent toute responsabilité quant aux dommages causés aux étudiants, à l'établissement de formation et/ou à des tiers du fait de l'utilisation du matériel en dehors du contexte d'une pure formation, à moins que ces dommages ne soient imputables à une faute intentionnelle ou à une négligence grave de Festo Didactic.

Référence : 548607  
Version : 10/2011  
Auteurs : Monika Bliesener, Ralph-Christoph Weber, Ulrich Karras, Dirk Zitzmann,  
Thomas Kathmann  
Graphisme : Doris Schwarzenberger  
Mise en page : 03/2012, Susanne Durz

© Festo Didactic GmbH & Co. KG, D-73770 Denkendorf, 2013

Internet : [www.festo-didactic.com](http://www.festo-didactic.com)

E-Mail : [did@de.festo.com](mailto:did@de.festo.com)

L'acheteur obtient un droit d'utilisation simple, non exclusif, non limité dans le temps et restreint géographiquement au site /siège de l'acheteur comme suit.

L'acheteur est autorisé à utiliser les contenus de l'ouvrage pour la formation continue du personnel du site et à utiliser aussi des éléments du contenu pour la réalisation de son propre matériel de formation continue du personnel de son site, à condition d'en mentionner la source, et à les dupliquer pour la formation continue sur le site. Pour les écoles/universités et centres de formation, ce droit d'utilisation englobe l'utilisation durant les cours par les élèves, stagiaires et étudiants du site.

En est exclu dans tous les cas le droit de publication ainsi que de chargement et d'utilisation sur intranet ou Internet ou sur plateformes LMS et bases de données telles que Moodle qui permettent à un grand nombre d'utilisateurs d'y accéder en dehors du site de l'acheteur.

Tous les autres droits de transmission, de reproduction, de duplication, d'édition, de traduction, de microfilmage ainsi que le transfert, le stockage et le traitement intégral ou partiel sur des systèmes électroniques présupposent l'accord préalable de Festo Didactic GmbH & Co. KG.

## Table des matières

1	Robotino® – un système d'apprentissage de la robotique mobile et de l'automatique	VII
1.1	Domaines d'utilisation des robots mobiles	VIII
1.2	Missions dans l'industrie	X
2	Le système d'apprentissage Robotino®	XI
2.1	Groupes cibles et sujets	XI
2.2	Robotino® est intéressant	XI
2.3	Démarche expérimentale	XII
2.4	Travaux pratiques	XIII
2.5	Sujets et contenus	XIII
2.6	Objectifs pédagogiques	XIII
3	Un enseignement totalement différent	XV
3.1	Sujets	XV
3.2	Apprendre par l'expérience	XV
3.3	Avantages pour l'étudiant	XV
3.4	Avantages pour l'enseignant/l'établissement de formation	XVI
3.5	Tâches de l'enseignant	XVI
3.6	Aide méthodologique à l'intention du formateur	XVII
3.6.1	Autres exemples	XVII
3.7	Formes sociales Compétitions	XVIII
3.8	Télécommande de Robotino® en cours	XVIII

## Travaux pratiques et corrigés

Projet 1	Contrôle de réception et mise en service de Robotino®	1
Projet 2	Déplacement rectiligne d'un système robotique mobile dans des directions quelconques	5
Projet 3	Déplacement rectiligne et positionnement d'un système robotique mobile	29
Projet 4	Suivi de trajectoire d'un système de manutention sans conducteur avec deux détecteurs à réflexion	37
Projet 5	Accostage précis d'un poste de chargement	49
Projet 6	Approche d'un obstacle et maintien à une distance définie	61
Projet 7	Contournement d'un poste et arrêt à diverses positions de transfert	65
Projet 8	Suivi de trajectoire d'un système de manutention sans conducteur avec un capteur inductif analogique	69
Projet 9	Détermination du comportement optimal au roulage	79
Projet 10	Suivi de trajectoire d'un système de manutention sans conducteur à l'aide de la webcam	91
Projet 11	Recherche d'un objet de couleur et approche de ce dernier à l'aide de la webcam	99

### Nota

Les travaux pratiques et corrigés reposent sur la version 2.8 de Robotino® View.

## Travaux pratiques

Projet 1	Contrôle de réception et mise en service de Robotino®	1
Projet 2	Déplacement rectiligne d'un système robotique mobile dans des directions quelconques	9
Projet 3	Déplacement rectiligne et positionnement d'un système robotique	25
Projet 4	Suivi de trajectoire d'un système de manutention sans conducteur avec deux détecteurs à réflexion	35
Projet 5	Accostage précis d'un poste de chargement	47
Projet 6	Approche d'un obstacle et maintien à une distance définie	57
Projet 7	Projet 7 Contournement d'un poste et ralliement de différentes positions de transfert	63
Projet 8	Suivi de trajectoire d'un système de manutention sans conducteur avec un capteur inductif analogique	67
Projet 9	Détermination du comportement optimal au roulage	77
Projet 10	Suivi de trajectoire d'un système de manutention sans conducteur à l'aide de la webcam	85
Projet 11	Recherche d'un objet de couleur et approche de ce dernier à l'aide de la webcam	91

### Nota

Les travaux pratiques et corrigés reposent sur la version 2.8 de Robotino® View.

## Théorie

1	Régulation/Régulateur PID	1
1.1	Qu'est-ce que la régulation ?	1
1.1.1	Commande/Régulation	1
1.1.2	Terminologie de base de la régulation	1
1.2	Description du comportement temporel de systèmes réglés	6
1.3	Régulateur	7
1.3.1	Régulateur proportionnel	8
1.3.2	Régulateur intégral	9
1.3.3	Régulateur dérivé	10
1.3.4	Régulateurs combinés	11
1.3.5	Structure et paramétrage du régulateur	14
2	Sous-systèmes des robots: Actionneur	17
2.1	Généralités sur les robots omnidirectionnels	17
2.2	Roues omnidirectionnelles	19
2.3	Liberté de mouvement d'un système sur un plan et dans l'espace	21
2.3.1	Degrés de liberté	21
2.3.2	Système de coordonnées	22
2.3.3	Mouvements des corps	23
2.4	Commande d'un entraînement omnidirectionnel	24
2.4.1	Commande et direction de déplacement	25
2.4.2	Commande des trois moteurs de Robotino®	25

3	Caractéristique _____	27
3.1	Enregistrement d'une caractéristique _____	27
3.2	Linéarisation de la caractéristique _____	27
4	Télémètre infrarouge _____	28
4.1	Capteurs à infrarouge dans Robotino® View _____	29
5	Capteurs de proximité optiques _____	31
5.1	Structure des capteurs de proximité optiques _____	31
5.2	Réserve de fonctionnement des capteurs de proximité optiques _____	32
5.3	Caractéristiques techniques _____	33
5.4	Préconisations d'emploi _____	34
5.5	Masquage d'arrière-plan sur détecteur à réflexion _____	34
5.6	Sensibilité réglable _____	35
5.7	Comportement du détecteur à réflexion en présence d'un objet miroitant _____	35
5.8	Exemples d'application _____	36
5.9	Capteurs de proximité optiques avec fibres optiques _____	37
5.9.1	Préconisations d'emploi _____	38
5.9.2	Exemples d'application _____	38
6	Capteur inductif _____	40
6.1	Application _____	40
7	Ceinture de protection, détection anticollision _____	41
7.1	Domaines d'application _____	41
7.2	Le parechoc dans Robotino® View _____	41
8	Webcam _____	42
9	Le potentiel de Robotino® pour une formation professionnelle moderne _____	43
9.1	Objectifs d'une formation professionnelle moderne _____	43
9.2	Le système d'apprentissage Robotino® en tant que partie intégrante d'une formation professionnelle moderne _____	43
9.3	Conclusion _____	





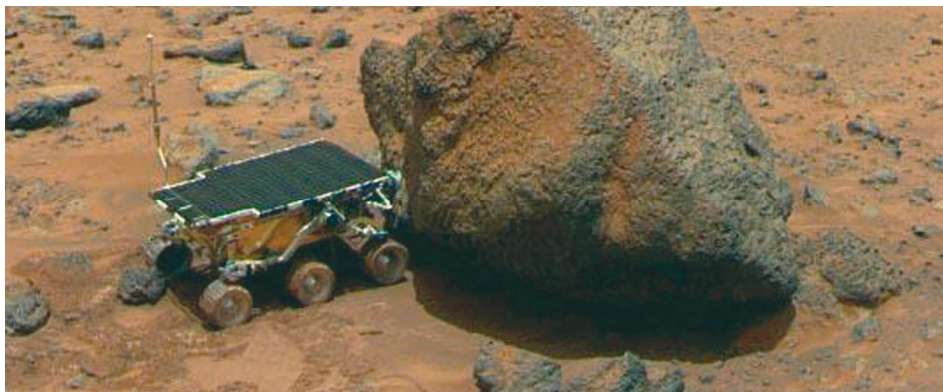
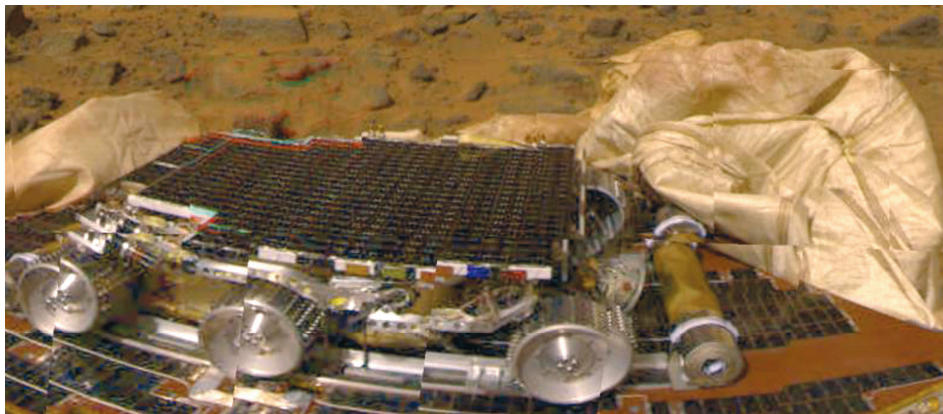
# 1 Robotino® – un système d'apprentissage de la robotique mobile et de l'automatique

Les robots mobiles obéissent à des ordres parlés et ils sont capables de détecter et de localiser des objets tridimensionnels.

Jusqu'à présent les systèmes robotiques étaient stationnaires. Les robots mobiles constituent l'étape suivante de l'évolution de la robotique. Les systèmes mobiles sont capables d'exécuter les mêmes travaux que leurs prédécesseurs sédentaires. Mais de plus, ils peuvent se rendre d'un lieu à un autre.

Ils remplissent la condition indispensable à l'exécution de nombreuses autres tâches.

Le robot Sojourner qui a été déposé sur Mars par la sonde Pathfinder, a placé les robots mobiles sous les feux de la rampe en faisant les gros titres de la presse. Ce projet de la NASA a également montré combien la navigation était importante pour les robots mobiles. Le fait que le robot ait réussi à s'éloigner de 10 cm de la capsule spatiale, a déjà été considéré comme un succès.



Mais les robots mobiles sont également très utiles dans d'autres domaines. Ils permettent d'investiguer des canalisations, le monde sous-marin et des volcans, c.-à-d. des environnements d'accès difficile pour l'homme.

### 1.1 Domaines d'utilisation des robots mobiles

Le développement et l'analyse des robots mobiles sont motivés par la nécessité et le souhait de mettre des robots en oeuvre pour assister l'homme dans ses travaux et dans son environnement quotidien. Dans les bureaux, hôpitaux, musées, bibliothèques, supermarchés, stades (pour tondre le gazon), halles d'exposition, aéroports, gares, universités, écoles et un jour aussi dans un environnement domestique.



Pour les handicapés et les personnes âgées, un moyen de transport est synonyme de plus de liberté et d'autonomie. Les capacités d'orientation, de navigation et de détection automatique et de contournement d'obstacles sont à cet égard primordiales.

Le Centre de recherche sur l'automatique de Karlsruhe a développé James, un robot de service. Comme ses frères Stan et Ollie, il est capable de planifier et d'exécuter de façon autonome les travaux qui lui sont confiés par la station centrale. Divers capteurs tels qu'un scanneur laser, des capteurs de distance à ultrasons et des caméras lui permettent d'identifier son environnement et de contourner les obstacles qui se présentent. La planification et l'exécution des travaux sont assurées par plusieurs cartes d'ordinateur et un logiciel adéquat. Ses roues lui confère une mobilité omnidirectionnelle.

Il suffit p. ex. de charger le plan d'un bâtiment pour que de tels robots soient capables d'y effectuer des courses. Ils conviennent dans ce cas à une mise en oeuvre dans les hôpitaux et grands hôtels. Ils peuvent alors y amener draps et serviettes de bain à la lingerie ou distribuer les repas. Il est également concevable de leur faire nettoyer les sols.

Les robots mobiles sont volontiers utilisés dans les musées comme gardiens. Ils sont petits, invisibles dans l'obscurité, rapides et silencieux. Equipés de détecteurs de chaleur et de mouvements, ils localisent immédiatement les visiteurs indésirables et déclenchent l'alarme.



Le robot comme aide familiale	"Que puis-je faire pour vous ?"	Fin de journée de travail, lorsque les batteries sont vides
<p>Tokyo (AP) – Ses mouvements manquent encore de souplesse et sont un peu lents, la voix est un peu monotone, mais il se tourne volontiers avec sa télécommande vers la télévision et apporte des boissons. Dans quelques années, le robot HRP-2, développé actuellement dans un laboratoire de recherche japonais, sera probablement devenu une aide familiale acceptable.</p> <p>Les robots, nommés Promet, sont conçus par l'Institut national des Sciences industrielles avancées et de la Technique. Ils obéissent à des ordres parlés et ils sont capables de détecter des objets tridimensionnels et de les localiser à l'aide de capteurs infrarouge. "Nous espérons en faire en quelque sorte des chiens de service", dit Isao Hara, directeur de recherche de l'institut de Tsukuba au nord-est de Tokyo, à propos de deux robots bleu métallique. "Je crois qu'ils sont capables de coopérer avec les humains. Nous cherchons à présent à savoir comment les intégrer dans la société humaine."</p>	<p>Lorsque Hara appelle un robot : "Viens, s'il te plaît", celui-ci répond : "Que puis-je faire pour vous ?" A la demande d'allumer la télévision, le Promet répond : "Je vais allumer la télévision" puis s'exécute. Et quand Hara lui demande une bouteille, il transmet cet ordre au prochain robot : "Occupe-toi de cette tâche, s'il te plaît." Hara explique que les robots sont en mesure de reproduire tous les mouvements humains, sauf la course. Ils feraient trop de bruit et les robots métalliques seraient trop secoués. Ils ne se déplacent donc que paisiblement. Les robots doivent avant tout communiquer avec les humains, localiser des objets et savoir agir de façon autonome, déclare Hara. "Ils peuvent aider comme le font les chiens".</p>	<p>Le Japon est considéré comme le leader en robotique. Des sociétés telles que Sony, Hitachi et Honda ont développé des robots essentiellement destinés à distraire. Ils sont déjà omniprésents en production industrielle. Lorsque les robots cessent d'obéir aux ordres humains, c'est que leurs batteries sont vides. Et c'est ainsi qu'un Promet qui cessa d'exécuter son travail en pleine démonstration, a dû d'abord être rechargé à l'aide d'un appareil spécial.</p>

Extrait du quotidien Esslinger Zeitung du 22/02/06

## 1.2 Missions dans l'industrie

### Système de manutention sans conducteur

Les systèmes de manutention autonomes sans conducteur se rencontrent de plus en plus souvent dans les ateliers de production innovants et dans les zones dangereuses. Un système de manutention sans conducteur est un robot mobile. Il s'agit d'un système de manutention mobile sans conducteur, se déplaçant au sol. Le guidage automatique s'effectue soit sur des pistes prédéfinies soit sur des itinéraires définissables par l'utilisateur au sein d'un entrepôt ou d'un atelier de production. On distingue en conséquence les systèmes filoguidés des systèmes non filoguidés.



Les systèmes de manutention sans conducteur se prêtent particulièrement bien à l'approvisionnement et à l'évacuation des produits de chaînes d'assemblage, de lignes d'emballage et de machines et à la réalisation de dispositifs d'assemblage mis en oeuvre dans des lignes de préparation de commande et d'assemblage.

## 2 Le système d'apprentissage Robotino®

Les spécifications techniques particulières auxquelles doivent répondre tous les robots et leurs caractéristiques spécifiques sont :

- machines mobiles à orientation, navigation, détection et contournement d'obstacle autonomes
- autarcie énergétique et de calcul
- capteurs et actionneurs embarqués

Le système d'apprentissage Robotino® répond à ces spécifications et permet de se familiariser avec les divers domaines de connaissances techniques de la robotique mobile.

### 2.1 Groupes cibles et sujets

Formation initiale et continue :

- mise en service de systèmes mécatroniques
- acquisition et mise à l'échelle de diverses données de capteur
- commande électrique de moteurs
- actionneurs électriques
- régulation d'un système mécatronique
- programmation graphique d'applications pour le système robotique mobile
- analyse des données de capteur pour diverses applications
- initiation au traitement d'image

En particulier pour écoles professionnelles et universités :

- programmation en C++, C #, .Net et JAVA d'applications robotiques mobiles sur la base des API mises à disposition
- télécommande via Wi-Fi
- intégration d'un système vidéo
- programmation d'une navigation autonome

### 2.2 Robotino® est intéressant

- Il ne cache pas ses éléments techniques mais les laisse entrevoir par les ouvertures de son châssis
- C'est un plaisir que de le piloter soi-même en le rendant intelligent
- C'est une technique qui incite l'étudiant à la comprendre et à l'appliquer
- Constitué de composants utilisés dans l'industrie, il est proche de la réalité industrielle
- Il est peu encombrant et facile à transporter

### 2.3 Démarche expérimentale

Les expériences intéressantes avec Robotino® mettent l'étudiant en contact avec le système mécatronique et les sujets qui y sont liés. Il peut effectuer des essais et s'approprier le savoir technique requis dans la partie théorique intégrée.

Le logiciel Robotino® View permet à l'étudiant non seulement de programmer le comportement du système mais aussi de le modifier et de le tester en ligne en mode interactif via le réseau local sans fil (Wi-Fi).



Robotino® View : un exemple



Affichage en ligne des données de consigne de régulation et réelles par un oscilloscope virtuel

## 2.4 Travaux pratiques

Les travaux pratiques sont calqués sur les tâches d'automatisation qu'on rencontre dans l'industrie

Les expériences réalisables avec Robotino®

- fournissent des suggestions pour faciliter la compréhension d'une technologie donnée
- sont utiles, intéressants, claires et axés sur l'action pratique
- ils permettent une approche affective et haptique des sujets de l'automatique et de la robotique mobile

## 2.5 Sujets et contenus

Les contenus de formation susceptibles d'être abordés relèvent des domaines suivants :

- Mécanique
  - Architecture mécanique d'un système robotique mobile
- Mise en service
  - Mise en service d'un système robotique mobile
- Electrotechnique
  - Pilotage des moteurs
  - Mesure et analyse de grandeurs électriques
- Capteur
  - Commande de trajectoire par capteurs
  - Commande trajectoire sans collision par capteurs de distance
  - Commande de trajectoire par traitement d'images de caméra
- Régulation
  - Commande d'une motorisation omnidirectionnelle
- Programmation
  - Intuitive par câblage graphique de blocs fonctionnels prédéfinis
  - Programmation en C+, C #, .Net et JAVA sur la base d'une API Windows API et d'une API Linux (Bibliothèques de fonctions)
- Dépannage méthodique
  - Dépannage méthodique d'un système robotique mobile

## 2.6 Objectifs pédagogiques

Robotino® permet d'atteindre les objectifs pédagogiques suivants :

Les étudiants

- apprennent à manipuler une commande de moteur à régulation électrique
- connaissent les notions élémentaires et la structure d'une régulation de moteur à courant continu, savent en déterminer les grandeurs caractéristiques et la paramétrer
- connaissent les notions élémentaires de la technique des moteurs électriques
- comprennent le fonctionnement d'un entraînement à 3 axes omnidirectionnel, savent le mettre en service et le piloter
- savent mettre un système robotique mobile en service (logiciel et matériel) en prenant comme exemple le système Robotino®
- savent commander le déplacement du système robotique Robotino® dans diverses directions
- savent réaliser, au moyen d'un logiciel, une commande de trajectoire assurant le pilotage de Robotino® par des capteurs le long d'une trajectoire prédéfinie

- savent intégrer le traitement d'images dans la commande de Robotino®
- savent développer une commande de trajectoire autonome par capteur pour Robotino® avec détection d'objet et comportement exploratoire simple

De plus, il est possible d'atteindre les objectifs pédagogiques complémentaires suivants :

Les étudiants

- savent intégrer des capteurs supplémentaires
- savent intégrer au système des dispositifs mécaniques additionnels tels que des équipements de manipulation
- savent programmer (en C++) leurs propres algorithmes de navigation et de commande
- savent réaliser la navigation autonome de Robotino®



## 3 Un enseignement totalement différent

Les systèmes autonomes et mécatroniques gagnent régulièrement en importance. Le système d'apprentissage Robotino® permet de se familiariser avec les divers sujets de la robotique mobile. L'intérêt particulier du support pédagogique Robotino® est que le système couvre tous l'éventail des développements les plus récents.

Il en va de même de l'utilisation du Wi-Fi. Découvrez comment le programme chargé communique avec Robotino® via le réseau Wi-Fi.

### 3.1 Sujets

Les sujets pouvant être traités portent sur les process (maintenance, commande de process, p. ex.) mais aussi sur les technologies (automatique, programmation). Certains sous-domaines tels que les capteurs ou les automates peuvent être extraits pour les cours.

### 3.2 Apprendre par l'expérience

Au lieu de commencer comme d'habitude par la théorie, on débute ici par la pratique. Les étudiants peuvent procéder par essais et s'approprier les connaissances techniques requises. Les sujets des travaux pratiques sont par conséquent présentés sous forme d'essais/expériences.

Les expériences portent sur les contenus classiques de l'ancien programme de formation, mais sont plus axés sur l'action que les anciens cours (théoriques). Elles se réfèrent par conséquent aux champs d'apprentissage.

La théorie restant à l'arrière-plan, le système Robotino® mobile constitue le support pédagogique proprement dit. La théorie enseignée se limite à ce dont l'étudiant a besoin de savoir pour les travaux pratiques.

L'apprentissage avec le système Robotino® est conforme aux spécifications d'un enseignement axé sur l'action et de l'acquisition de compétences par l'action couronnée de succès.

### 3.3 Avantages pour l'étudiant

Les étudiants se familiarisent avec la robotique mobile de façon ludique à l'aide de travaux pratiques intéressants. Cette méthode stimule l'attention, la curiosité et les performances de l'étudiant.

Le niveau de difficulté des travaux augmente progressivement, l'étudiant ayant ainsi la possibilité d'évaluer après chaque exercice les progrès effectués. Il pourra réviser les connaissances acquises en réalisant d'autres travaux pratiques portant sur le même sujet. Les travaux pratiques sont fortement axés sur la pratique. Les problèmes traités sont des problèmes pouvant survenir dans l'industrie. Ce qui rend, pour l'étudiant, la résolution du problème, encore plus intéressant. Du fait que les étudiants ne se contentent pas d'écouter et d'observer mais participent activement au cours, ils sont encouragés à se pencher sur ces sujets et autres problèmes. Une méthode qui garantit de bons résultats.

Robotino® contribue à mieux faire comprendre les diverses technologies à l'étudiant.

### 3.4 Avantages pour l'enseignant/l'établissement de formation

Grâce à la motivation accrue et la meilleure compréhension de la technique, l'enseignant est en mesure d'inculquer plus rapidement aux étudiants les connaissances requises. Les facteurs perturbateurs auxquels l'enseignant doit faire face sont de ce fait moins nombreux.

L'enseignant bénéficie en retour d'une plus grande reconnaissance de la part des étudiants, des collègues et des entreprises formatrices car ce type d'enseignement est au plus haut point axé sur la pratique. Les cours peuvent être organisés et tenus sur la base des travaux pratiques. Ceux-ci, axés sur la pratique, peuvent également être utilisés comme sujet de devoirs sur table.

Robotino® permet également un enseignement multidisciplinaire.

### 3.5 Tâches de l'enseignant

L'une des tâches de l'enseignant est de transmettre les connaissances théoriques de base. Cet enseignement peut être axé sur la théorie. Il s'agit par ailleurs d'assister les étudiants durant les travaux pratiques en leur fournissant aide et conseils, l'enseignant assurant ici plutôt une fonction d'animateur.

Domaines d'utilisation dans l'enseignement	Sujets	Moyens pédagogiques	Forme d'apprentissage
Etablissements de formation professionnelle	Mécanique Régulation Programmation graphique, visuelle, symbolique, en ligne Traitement de l'image (en option)	Capteurs Montage Actionneurs électriques, commande de moteur, mesure et analyse Robotino® View Caméra (en option)	Travaux individuels ou en groupe Apprentissage par l'expérience sur la base des travaux axés sur la pratique axés sur la théorie axés sur l'étudiant
Lycée	Calcul vectoriel appliqué Motorisation omnidirectionnelle	Robotino® View Montage	Travaux individuels ou en groupe Apprentissage par l'expérience sur la base des travaux axés sur la pratique axés sur la théorie axés sur l'étudiant
Secteur TIC	Programmation en C Traitement de l'image (en option) Wi-Fi	C++, C #, .Net et JAVA LUA (Programmation de blocs de fonction) Caméra Wi-Fi Robotino® et ordinateur	Travaux individuels ou en groupe Apprentissage par l'expérience sur la base des travaux axés sur la pratique axés sur la théorie axés sur l'étudiant
Ecoles d'ingénieurs Universités	C++ et JAVA Calcul vectoriel Programmation d'une navigation autonome	C++, C #, .Net et JAVA Bibliothèques (logiciels) LUA (Programmation de blocs de fonction) MatLab et LabView interface	Travaux individuels ou en groupe Apprentissage par l'expérience sur la base des travaux axés sur la pratique axés sur la théorie axés sur l'étudiant

### 3.6 Aide méthodologique à l'intention du formateur

#### Exemple : Enseignement pluridisciplinaire

Robotino® se prête particulièrement bien à un enseignement pluridisciplinaire. Il est par exemple possible d'associer la programmation avec le logiciel Robotino® View (interface utilisateur graphique) à l'étude des capteurs.

#### Objectifs pédagogiques

L'objectif global est d'exploiter, dans la programmation, les données fournies par les capteurs de sorte que Robotino® se déplace le long d'une ligne matérialisée par une feuille d'aluminium.

Les objectifs détaillés sont la connaissance des fonctions, propriétés et domaines d'application des capteurs inductifs. De même que la maîtrise du logiciel Robotino® View et la familiarisation avec les symboles et leur fonction.

#### Problème

Que faut-il faire pour que Robotino® se déplace le long d'une ligne donnée ?

#### Contraintes

- Comment concevoir un concept de commande pour Robotino® ?
- Quels capteurs peut-on utiliser ?
- Pourquoi la ligne est-elle matérialisée par une feuille d'aluminium ?

Programmation	Robotino® View
	Programmation en C++, C #, .Net et JAVA
	LUA (Programmation de blocs de fonction)
	MatLab et LabView interface
	Wi-Fi
	Traitement d'images
Capteurs	Capteurs de distance à infrarouge
	Codeurs incrémentaux
	Capteur anticollision
	Capteur de proximité inductif analogique
	Capteur optique numérique

#### 3.6.1 Autres exemples

Autres exemples : il est possible combiner la technique de régulation et la programmation de Robotino®. On pourra dans ce cas faire mesurer et exploiter les grandeurs électriques de Robotino®.

Il est également concevable de créer un lien entre la mécanique technique et Robotino® View. L'étudiant pourra alors se familiariser avec l'effet de divers pignons en mécanique en les montant puis en les testant avec le programme qu'il aura conçu.

### 3.7 Formes sociales Compétitions

Organisation de compétitions entre équipes devant résoudre le même problème : La variété des approches et des solutions stimule la créativité et un esprit critique.

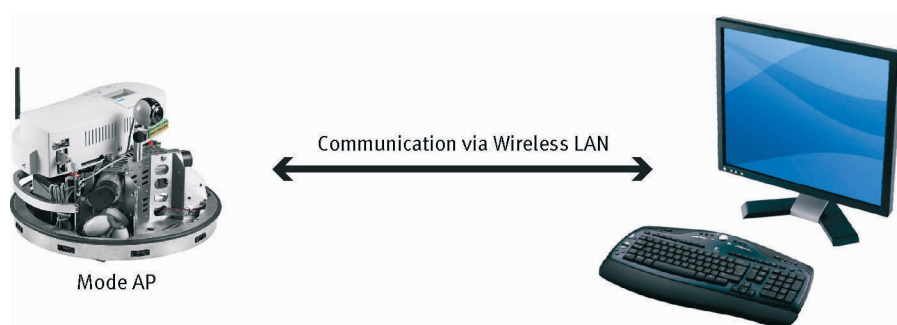
Évaluation : justesse, qualité, vitesse

### 3.8 Télécommande de Robotino® en cours

#### Utilisation d'un Robotino®

Robotino® est doté de son propre serveur Wi-Fi. Il suffit donc pour utiliser Robotino® d'un PC capable d'établir une connexion Wi-Fi.

Dans cette application le serveur Wi-Fi du Robotino® fonctionne en mode AP (Access Point).



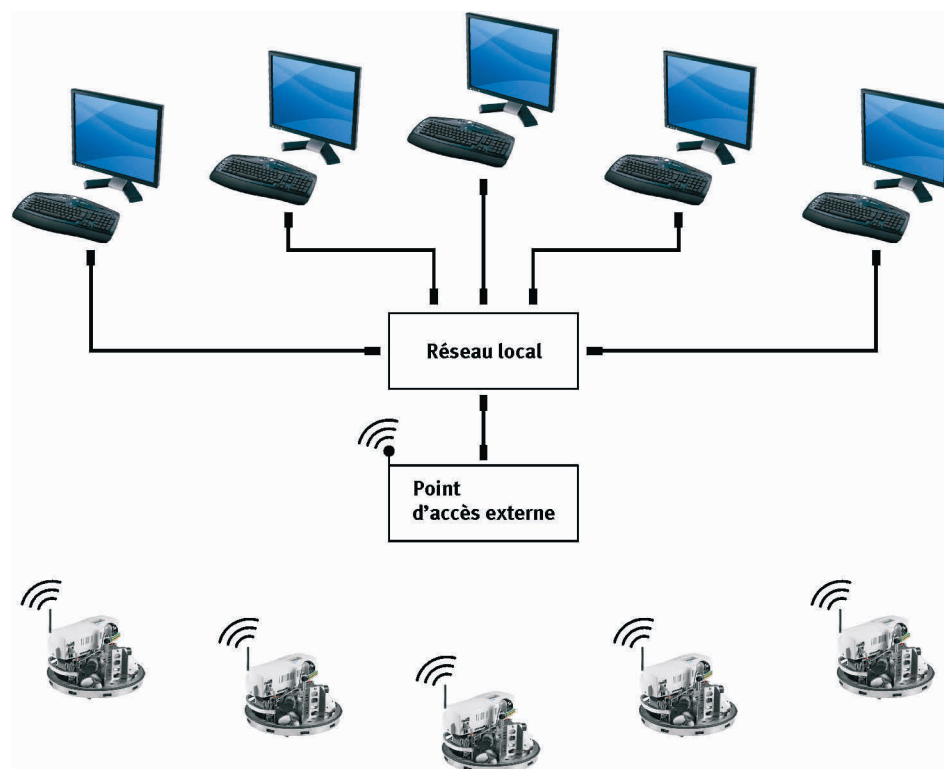
### Utilisation de trois à quatre Robotino®

Si vous voulez piloter trois à quatre Robotino® simultanément, vous pouvez utiliser l'application comme décrit ci-dessus.

- **Avantage**  
Tous les Robotino® peuvent posséder la même adresse IP parce qu'ils constituent chacun leur propre réseau.
- **Inconvénient**  
Plusieurs réseaux Wi-Fi peuvent être source de collisions si leurs canaux sont trop proches les uns des autres. On ne dispose que de 11 canaux et il est conseillé, pour des raisons de sécurité, de laisser trois canaux inactifs entre deux canaux actifs.

### Utilisation de plusieurs Robotino® lorsque les PC sont connectés au réseau de l'école.

Le point d'accès du Robotino® doit être mis en mode client AP en positionnant le commutateur qui se trouve directement sur le point d'accès du Robotino® et aussi dans le sous-menu Wi-Fi au niveau de l'afficheur du Robotino®. Il faut dans ce cas utiliser un point d'accès Wi-Fi central connecté au réseau local Ethernet.



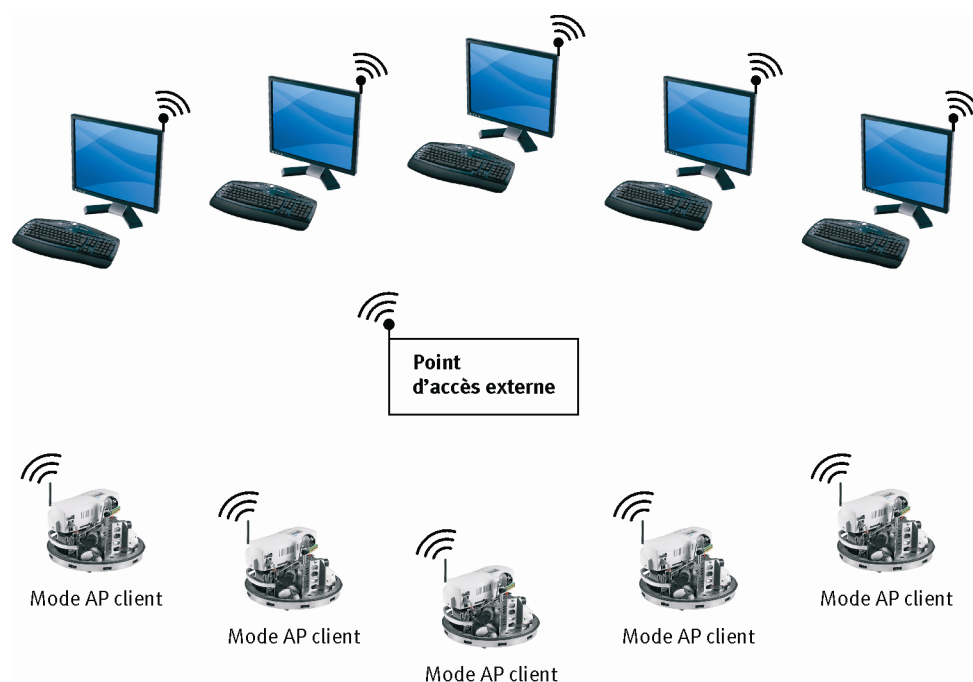
- **Avantage**  
Vous pouvez utiliser autant de Robotino® que vous le souhaitez au sein du réseau.
- **Inconvénient**  
Chaque Robotino® nécessite une adresse IP particulière que vous devrez entrer sur le clavier à membrane.

Le réseau local est également accessible de l'extérieur via le point d'accès non crypté.

Paramètres	Valeur
SSID	Robotino®APx.1
Canal	11
Cryptag	aucun

### Utilisation de plusieurs Robotino® en l'absence de réseau local

Le réseau Wi-Fi du Robotino® doit être mis en mode client AP en positionnant le commutateur qui se trouve directement sur Robotino® et aussi dans le sous-menu Wi-Fi au niveau de l'afficheur du Robotino®. Vous devrez utiliser dans ce cas un serveur Wi-Fi central supplémentaire.



- **Avantage**  
Vous pouvez utiliser autant de Robotino® que vous le souhaitez au sein du réseau.
- **Inconvénient**  
Chaque Robotino® nécessite une adresse IP particulière que vous devrez entrer sur le clavier à membrane.



## Travaux pratiques et corrigés

Projet 1	Contrôle de réception et mise en service de Robotino®	1
Projet 2	Déplacement rectiligne d'un système robotique mobile dans des directions quelconques	5
Projet 3	Déplacement rectiligne et positionnement d'un système robotique mobile	29
Projet 4	Suivi de trajectoire d'un système de manutention sans conducteur avec deux détecteurs à réflexion	37
Projet 5	Accostage précis d'un poste de chargement	49
Projet 6	Approche d'un obstacle et maintien à une distance définie	61
Projet 7	Contournement d'un poste et arrêt à diverses positions de transfert	65
Projet 8	Suivi de trajectoire d'un système de manutention sans conducteur avec un capteur inductif analogique	69
Projet 9	Détermination du comportement optimal au roulage	79
Projet 10	Suivi de trajectoire d'un système de manutention sans conducteur à l'aide de la webcam	91
Projet 11	Recherche d'un objet de couleur et approche de ce dernier à l'aide de la webcam	99

### Nota

Les travaux pratiques et corrigés reposent sur la version 2.8 de Robotino® View.



## Projet 1

### Contrôle de réception et mise en service de Robotino®

#### 1. Mise en service de Robotino®

a) Créez une liste de contrôle visuel pour vérifier que le système est bien complet.

Quantité	Dénomination	ok
3	Moteur DC (moteur à courant continu)	ok
3	Réducteur avec un rapport de démultiplication de 16:1	ok
3	Courroie crantée	ok
1	4 accus de 12 V, dont 2 fournis	ok
1	Châssis avec pare-chocs	ok
9	Capteur de distance à infrarouge	ok
3	Codeur incrémental, un par moteur	ok
3	Roulette omnidirectionnelle	ok
1	Capteur anticollision (pare-chocs)	ok
1	Capteur de proximité inductif analogique	ok
2	Capteur optique numérique (détecteur à réflexion)	ok
1	Unité de commande avec afficheur, contrôleur embarqué et interfaces (= boîtier de commande)	ok
1	Caméra	ok

Date

Date actuelle

Signature

Jean Dupont

b) Contrôlez le bon fonctionnement des composants et documentez vos résultats.

- c) Vérifiez à l'écran du panneau de commande que le système démarre correctement. Veillez à l'allumage des LED au panneau de commande.

Affichage	Description
LED	Allumée, état de marche
ROBOTINO®	
172.26.1.1	Adresse IP PC104
V2.0	Version du logiciel

- d) Vérifiez à l'écran du panneau de commande que les accus sont bien chargés.

État de charge des accus
L'état de charge est visualisé par un bargraphe sur le panneau de commande. Moins il y a de barres, plus la charge est faible.


Au repos, en l'absence de pannes électriques
Les roues sont au repos, aucune panne électrique n'est apparue.

- e) Consignez vos résultats sur la fiche de travail.

Résultats	
Mise en service le	Date actuelle
Mise en service par	Jean Dupont
Alimentation et état indiqué	ok
État de charge des accus	ok
Date	Date actuelle
Signature	Jean Dupont

## 2. Contrôle du comportement au roulage

a) Contrôlez le comportement au roulage de Robotino® en testant les applications de démonstration **Ligne droite, Cercle, Carre, et Exploration** .

– Observez le comportement sur cales et au roulage.

Description du comportement de la démonstration "Ligne droit"	
Sur cales Comportement des roulettes	Les roues avant tournent. M1 et M3 sont donc actifs.
Roulage Comportement Capteurs Comportement des roulettes	Roule en ligne droite. Le capteur anticollision (pare-chocs) est activé au contact d'un obstacle. Les roues avant tournent. M1 et M3 sont donc actifs.
Autres observations	Pour que le robot avance, M1 et M3 doivent tourner à la même vitesse dans l'axe de vision de Robotino®.

Description du comportement de la démonstration "Cercle"	
Sur cales Comportement des roulettes	Les trois roues tournent. À intervalles décalés, les roues tournent une fois vers l'avant, une fois vers l'arrière.
Roulage Comportement Capteurs Comportement des roulettes	L'orientation est conservée, de sorte que "l'axe de vision" de Robotino® reste inchangé. Capteur anticollision (pare-chocs) Les trois roues tournent.
Autres observations	Les trois roues participent au roulage en cercle. À intervalles décalés, les roues tournent une fois vers l'avant, une fois vers l'arrière.

Description du comportement de la démonstration "Care"	
<p>Sur cales</p> <p>Comportement des roulettes</p>	<p>Toutes les roues tournent. M2 et M3 tournent dans un sens, M1 dans l'autre. Pour que le robot avance, M1 et M3 doivent tourner à la même vitesse dans l'axe de vision de Robotino®.</p>
<p>Roulage</p> <p>Comportement</p> <p>Capteurs</p> <p>Comportement des roulettes</p>	<p>L'orientation est conservée, "l'axe de vision" de Robotino® étant toujours dirigé vers l'intérieur.</p> <p>Capteur anticollision (pare-chocs)</p> <p>Toutes les roues tournent, M1 et M3 tournent dans l'axe de vision de Robotino®.</p>
<p>Autres observations</p>	<p>Optimum : les déplacements rectilignes sont de longueurs égales, tandis que la direction des roulettes change, de sorte que le robot décrit un rectangle. Il se peut cependant que l'angle droit ne soit pas décrit parfaitement et que les trajets parcourus ne soient pas de longueurs identiques.</p>

Description du comportement de la démonstration "Exploration"	
<p>Sur cales</p> <p>Comportement des roulettes</p>	<p>Les roues avant tournent. M1 et M3 sont actifs. Pour que le robot avance, M1 et M3 doivent tourner dans l'axe de vision de Robotino®.</p> <p>À l'actionnement des capteurs de distance à infrarouge 1, 2, 9 : M1 change de sens, M3 est activé, d'où une manœuvre d'évitement. L'évitement s'obtient par rotation plus rapide de toutes les roues dans le même sens.</p>
<p>Roulage</p> <p>Comportement</p> <p>Capteurs</p> <p>Comportement des roulettes</p>	<p>Tente d'éviter la collision avec un obstacle, effectue une manœuvre d'évitement.</p> <p>Seuls les capteurs de distance à infrarouge avant sont actifs. Robotino® détecte ainsi des obstacles situés à portée des capteurs de distance à infrarouge 1, 2, 9.</p> <p>L'évitement s'obtient par rotation plus rapide de toutes les roues dans le même sens. Évite l'obstacle par la gauche.</p>
<p>Autres observations</p>	<p>Il s'agit d'un déplacement rectiligne, comme dans le programme "Marche avant". Grâce à l'activation des capteurs à infrarouge, Robotino® ne s'arrête pas lorsqu'il rencontre un obstacle, mais l'évite. L'évitement s'obtient par rotation plus rapide de toutes les roues dans le même sens. Évite l'obstacle par la gauche.</p>



## Travaux pratiques

Projet 1	Contrôle de réception et mise en service de Robotino®	1
Projet 2	Déplacement rectiligne d'un système robotique mobile dans des directions quelconques	9
Projet 3	Déplacement rectiligne et positionnement d'un système robotique	25
Projet 4	Suivi de trajectoire d'un système de manutention sans conducteur avec deux détecteurs à réflexion	35
Projet 5	Accostage précis d'un poste de chargement	47
Projet 6	Approche d'un obstacle et maintien à une distance définie	57
Projet 7	Projet 7 Contournement d'un poste et ralliement de différentes positions de transfert	63
Projet 8	Suivi de trajectoire d'un système de manutention sans conducteur avec un capteur inductif analogique	67
Projet 9	Détermination du comportement optimal au roulage	77
Projet 10	Suivi de trajectoire d'un système de manutention sans conducteur à l'aide de la webcam	85
Projet 11	Recherche d'un objet de couleur et approche de ce dernier à l'aide de la webcam	91

### Nota

Les travaux pratiques et corrigés reposent sur la version 2.8 de Robotino® View.



## Projet 1

### Contrôle de réception et mise en service de Robotino®

#### ■ Objectifs pédagogiques

Les étudiants apprendront à

- connaître les principaux composants d'un système mobile à l'exemple de Robotino® ;
- savoir mettre en service un système robotique mobile à l'exemple de Robotino® ;
- savoir tester et décrire le comportement au roulage de Robotino®.

#### ■ Problème

Vous êtes chargé de réaliser le contrôle de réception et la première mise en service d'un système mécatronique complexe.

#### ■ Projet

Procédez au contrôle de réception et à la première mise en service de Robotino®.

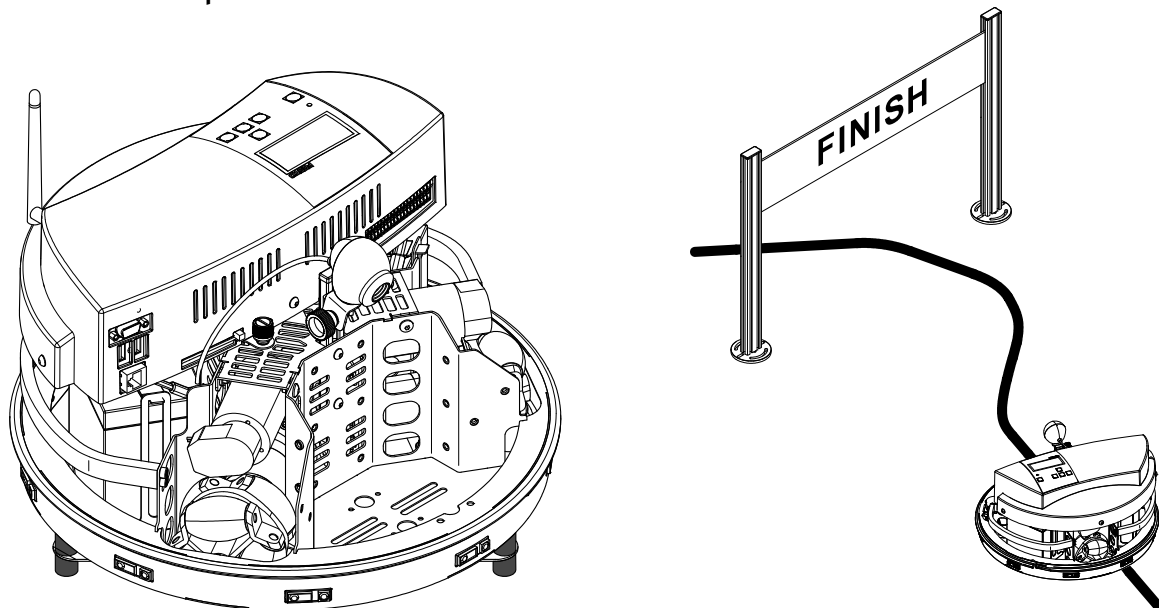
Le contrôle de réception comprend :

- l'établissement et la vérification d'une liste de contrôle visuel.

La première mise en service comprend :

- la séquence de démarrage correcte du système ;
- la vérification de l'état de charge des accus ;
- le test des programmes de déplacement **Cercle, Ligne droite, Carre, Exploration** ;
- la documentation des résultats.

#### ■ Schéma d'implantation



■ **Travaux à exécuter**

1. Mise en service de Robotino®
2. Contrôle du comportement au roulage

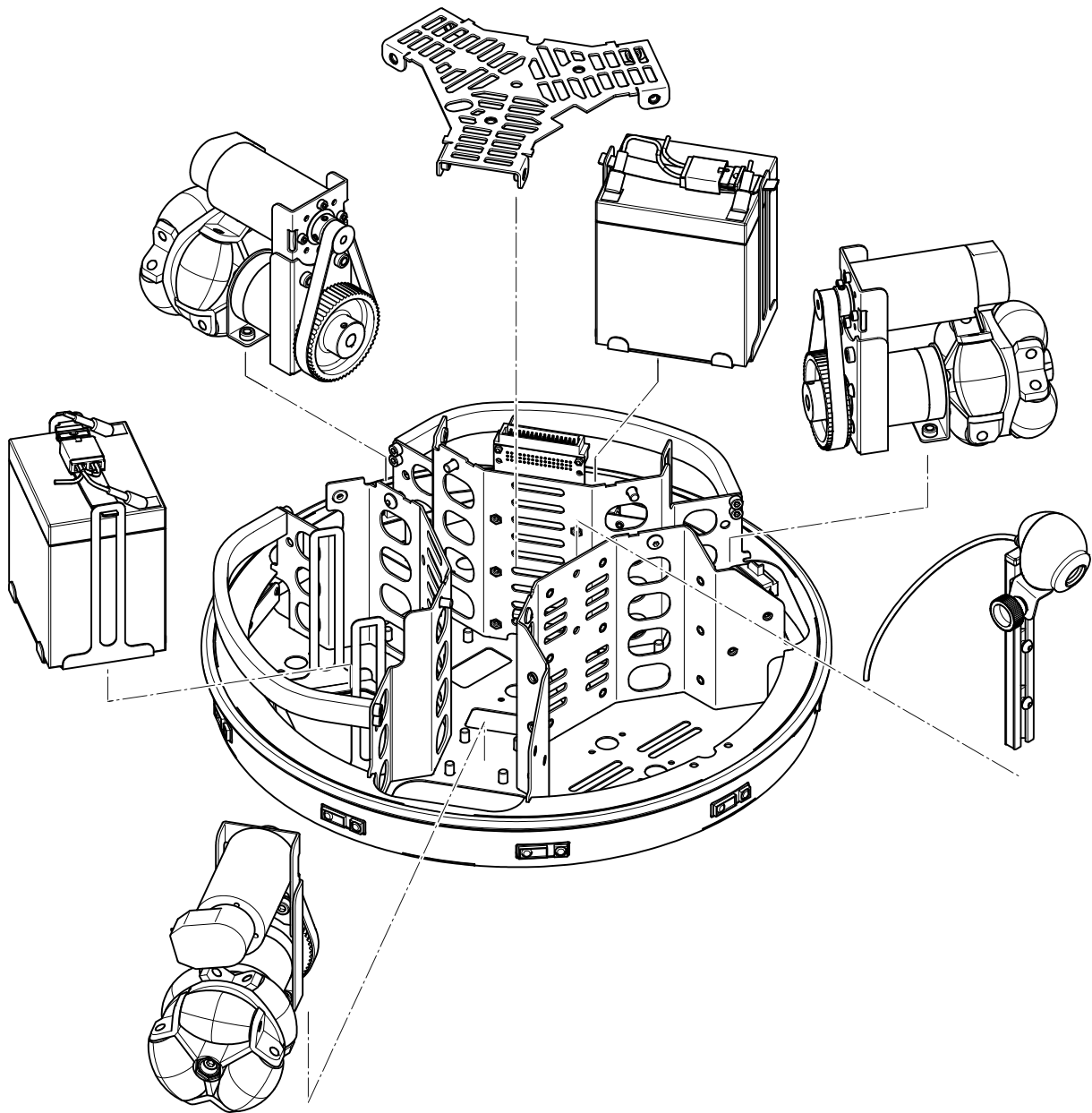
■ **Aides**

Documentation technique de Robotino®

## 1. Mise en service de Robotino®

- a) Créez une liste de contrôle visuel pour vérifier que le système est bien complet.

Consultez à cet effet la documentation technique pour savoir quels sont les composants que le système doit comporter.



Les principaux composants sont notamment :

3 moteurs à courant continu  
 4 accus de 12 V, 2 accus de rechange  
 châssis avec pare-chocs  
 capteurs de distance  
 plate-forme de travail avec webcam (caméra)  
 contrôleur embarqué

- Remplissez la liste de contrôle et cochez les éléments présents.

[illegible]

Date :

[illegible]

Signature :

[illegible]

- b) Contrôlez le bon fonctionnement des composants et documentez vos résultats.

Procédez pour les travaux suivants comme indiqué dans la documentation technique sous "Mise en service".

- Mettez le système sur cales de manière à ce que les roues tournent librement.
- Branchez Robotino® au secteur, puis mettez la commande du système en marche.



- c) Vérifiez à l'écran du panneau de commande que le système démarre correctement. Veillez à l'allumage des LED au panneau de commande.

Affichage	Description

- d) Vérifiez à l'écran du panneau de commande que les accus sont bien chargés.

État de charge des accus

Au repos, en l'absence de pannes électriques

- e) Consignez vos résultats sur la fiche de travail.

Résultats	
Mise en service le	
Mise en service par	
Alimentation et état indiqué	
État de charge des accus	
Datum	
Signature	

2. Contrôle du comportement au roulage

- a) Contrôlez le comportement au roulage de Robotino® en testant les applications de démonstration **Ligne droite, Cercle, Carre, et Exploration** .
- Observez le comportement sur cales et au roulage.



Veillez à ce que, pour le programme **Exploration**, Robotino® n'ait à éviter que des obstacles situés au niveau du sol ! Il risque sinon d'être endommagé.

- Démarrez les programmes **Ligne droite, Cercle, Carre, Exploration** une fois sur cales et une fois au roulage.

Procédez comme indiqué dans la documentation technique sous "Test des programmes de démonstration". Sélectionnez le programme voulu dans le menu affiché à l'écran.

- Décrivez le comportement des trois roulettes omnidirectionnelles en termes de mouvement et de sens de rotation lors de l'exécution des programmes **Ligne droite, Cercle, Carre, et Exploration**.

Veillez, au roulage, à la direction dans laquelle "regarde" Robotino®.

- Quels sont les capteurs qui réagissent ?
- Justifiez le comportement. Quelle est la relation qui existe entre mouvement des roues et comportement au roulage ?

Description du comportement de la démonstration "Ligne droit"	
Sur cales Comportement des roulettes	
Roulage Comportement	
Capteurs	
Comportement des roulettes	
Autres observations	

Description du comportement de la démonstration "Cercle"	
Sur cales Comportement des roulettes	
Roulage Comportement Capteurs  Comportement des roulettes	
Autres observations	

Description du comportement de la démonstration "Carre"	
Sur cales Comportement des roulettes	
Roulage Comportement Capteurs  Comportement des roulettes	
Autres observations	

Description du comportement de la démonstration "Exploration"	
Sur cales Comportement des roulettes	
Roulage Comportement  Capteurs Comportement des roulettes	
Autres observations	

# Théorie

1	Régulation/Régulateur PID	1
1.1	Qu'est-ce que la régulation ?	1
1.1.1	Commande/Régulation	1
1.1.2	Terminologie de base de la régulation	1
1.2	Description du comportement temporel de systèmes réglés	6
1.3	Régulateur	7
1.3.1	Régulateur proportionnel	8
1.3.2	Régulateur intégral	9
1.3.3	Régulateur dérivé	10
1.3.4	Régulateurs combinés	11
1.3.5	Structure et paramétrage du régulateur	14
2	Sous-systèmes des robots: Actionneur	17
2.1	Généralités sur les robots omnidirectionnels	17
2.2	Roues omnidirectionnelles	19
2.3	Liberté de mouvement d'un système sur un plan et dans l'espace	21
2.3.1	Degrés de liberté	21
2.3.2	Système de coordonnées	22
2.3.3	Mouvements des corps	23
2.4	Commande d'un entraînement omnidirectionnel	24
2.4.1	Commande et direction de déplacement	25
2.4.2	Commande des trois moteurs de Robotino®	25
3	Caractéristique	27
3.1	Enregistrement d'une caractéristique	27
3.2	Linéarisation de la caractéristique	27
4	Télémètre infrarouge	28
4.1	Capteurs à infrarouge dans Robotino® View	29
5	Capteurs de proximité optiques	31
5.1	Structure des capteurs de proximité optiques	31
5.2	Réserve de fonctionnement des capteurs de proximité optiques	32
5.3	Caractéristiques techniques	33
5.4	Préconisations d'emploi	34
5.5	Masquage d'arrière-plan sur détecteur à réflexion	34
5.6	Sensibilité réglable	35
5.7	Comportement du détecteur à réflexion en présence d'un objet miroitant	35
5.8	Exemples d'application	36
5.9	Capteurs de proximité optiques avec fibres optiques	37
5.9.1	Préconisations d'emploi	38
5.9.2	Exemples d'application	38

6	Capteur inductif _____	40
6.1	Application _____	40
7	Ceinture de protection, détection anticollision _____	41
7.1	Domaines d'application _____	41
7.2	Le parechoc dans Robotino® View _____	41
8	Webcam _____	42
9	Le potentiel de Robotino® pour une formation professionnelle moderne _____	43
9.1	Objectifs d'une formation professionnelle moderne _____	43
9.2	Le système d'apprentissage Robotino® en tant que partie intégrante d'une formation professionnelle moderne _____	43
9.3	Conclusion _____	45

# 1 Régulation/Régulateur PID

## 1.1 Qu'est-ce que la régulation ?

Les machines ou installations imposent souvent de régler à des valeurs prescrites des grandeurs telles que la pression, la température ou le débit. Ces grandeurs, une fois réglées, ne doivent pas en outre varier à l'apparition de perturbations. Cette mission est assurée par une régulation.

L'automatique s'occupe de tous les problèmes apparaissant dans le cadre de cette mission.

Pour qu'une grandeur à réguler puisse être mise à la disposition d'un régulateur automatique sous forme de signal électrique, il faut d'abord la mesurer et la convertir de manière adéquate.

Cette grandeur doit alors être comparée dans le régulateur à la valeur ou à l'évolution prescrite. La comparaison doit permettre de déterminer comment agir sur l'installation.

Enfin, il faut trouver dans l'installation un point adéquat permettant d'influencer la grandeur à réguler (par exemple, l'organe de réglage d'un chauffage). Pour ce faire, il est important de savoir comment se comporte l'installation.

La régulation cherche à trouver des liens universels s'appliquant de la même façon à toutes les technologies. La plupart des ouvrages didactiques les expliquent par les mathématiques. Dans le présent chapitre, nous avons voulu expliquer les notions élémentaires et connaissances de la régulation en renonçant dans une large mesure aux mathématiques.

### 1.1.1 Commande/Régulation

#### Commande

Définition de la norme allemande DIN 19222 : La commande est une action exercée sur un système dans laquelle une ou plusieurs grandeurs d'entrée influencent une ou plusieurs grandeurs de sortie en fonction de règles propres au système.

La caractéristique de la commande est son action en boucle ouverte, c'est-à-dire qu'il n'y a aucune réaction de la grandeur de sortie sur la grandeur d'entrée.

#### Régulation

Définition de la norme DIN 19222 : La régulation est une action exercée sur un système dans laquelle la grandeur à réguler (grandeur réglée) est en permanence mesurée et comparée à la valeur de consigne (grandeur de référence). Suivant le résultat de cette comparaison, on agit alors sur la grandeur d'entrée du système de telle manière que, malgré les influences perturbatrices, la grandeur de sortie s'aligne sur la valeur de consigne. Par cette réaction, on obtient une action en boucle fermée.

### 1.1.2 Terminologie de base de la régulation

#### Grandeur de référence

La grandeur de référence  $W$  est aussi désignée par valeur de consigne de la grandeur réglée. Elle prescrit la valeur désirée de la grandeur réglée. La grandeur de référence peut être constante dans le temps, mais peut aussi varier avec le temps. La valeur réelle de la grandeur réglée est appelée valeur instantanée ou, tout simplement, valeur réelle.

En régulation, il s'agit de maintenir la grandeur à réguler à une valeur prescrite ou de l'asservir à une évolution prescrite. Cette valeur prescrite est appelée grandeur de référence.

## **Grandeur réglée**

### **Définition**

L'objectif d'une régulation est de maintenir une grandeur à une valeur prescrite ou de l'asservir à une évolution prescrite. Cette grandeur à réguler est appelée grandeur réglée  $x$ .

Ce problème se pose dans des installations et machines des technologies les plus diverses. La grandeur à réguler est alors appelée grandeur réglée.

### **Exemple de la vitesse d'un moteur à courant continu**

Voir Projet 2

La valeur de consigne et la valeur réelle de la vitesse doivent pratiquement coïncider pour obtenir un comportement en déplacement optimal.

Les grandeurs réglées peuvent être, par exemple :

- la pression dans un accumulateur pneumatique,
- la pression sur une presse hydraulique,
- la température dans un bain de galvanisation,
- le débit de réfrigérant dans un échangeur de chaleur,
- la concentration d'un produit chimique dans un réacteur à cuve d'agitation,
- la vitesse d'avance sur une machine-outil à entraînement électrique,
- la vitesse d'un moteur.

### **Grandeur réglante**

Une régulation automatique ne peut avoir lieu que si la machine ou l'installation offre une possibilité d'agir sur la grandeur réglée.

Dans toute installation, il est possible d'agir sur la grandeur réglée par une intervention. Ce n'est qu'avec une telle intervention qu'il est possible d'amener ou de ramener la grandeur réglée à la valeur prescrite. La grandeur qui entraîne une telle intervention est appelée grandeur réglante  $y$ .

Les grandeurs réglantes peuvent être, par exemple :

- la position du réducteur d'échappement d'un accumulateur pneumatique,
- la position du régulateur de pression hydraulique,
- la tension appliquée au chauffage électrique du bain de galvanisation,
- la position du limiteur de débit du circuit du réfrigérant,
- la position du robinet de la conduite d'alimentation en produit chimique,
- la tension aux bornes de l'induit du moteur.

### **Grandeur perturbatrice $z$**

Tout système réglé fait l'objet de perturbations. Ce sont elles qui rendent souvent nécessaire la régulation. Ces actions perturbatrices sont désignées par grandeurs perturbatrices  $z$ .

Le système réglé est la partie de la machine ou de l'installation dans laquelle la grandeur réglée doit être amenée à la valeur prescrite et au niveau de laquelle les grandeurs réglantes compensent les grandeurs perturbatrices. Un système réglé a non seulement la grandeur réglante comme grandeur d'entrée, mais aussi d'autres grandeurs d'entrée constituées des grandeurs perturbatrices.



**Ecart de régulation  $x_d$** 

La différence entre grandeur de référence et grandeur réglée est désignée par écart de régulation  $x_d$ . Il se calcule à partir de la différence :

$$x_d = e = W - x$$

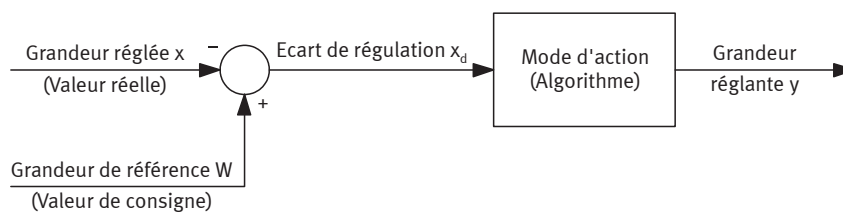
**Mode d'action**

Le mode d'action indique comment réagit le système réglé aux variations de la grandeur d'entrée. La détermination du mode d'action est l'objectif de la régulation.

**Régulateur**

Le régulateur a pour mission de maintenir la grandeur réglée aussi proche que possible de la grandeur de référence. Dans le régulateur, la valeur de la grandeur réglée est comparée en permanence à la valeur de la grandeur de référence.

Cette comparaison et le mode d'action sont utilisés pour déterminer et délivrer la valeur de la grandeur réglante.

**Organe de réglage et servomoteur**

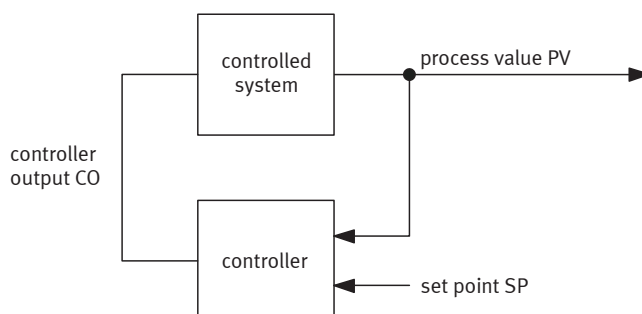
L'organe de réglage fait varier la grandeur réglée. L'organe de réglage est généralement actionné par un servomoteur particulier. Un servomoteur est toujours nécessaire quand l'organe de réglage n'est pas en mesure d'actionner directement l'organe de réglage.

**Organe de mesure**

Pour la rendre accessible au régulateur, la grandeur réglée doit être acquise par un organe de mesure (capteur, transducteur) et convertie en une grandeur physique que le régulateur peut traiter en entrée.

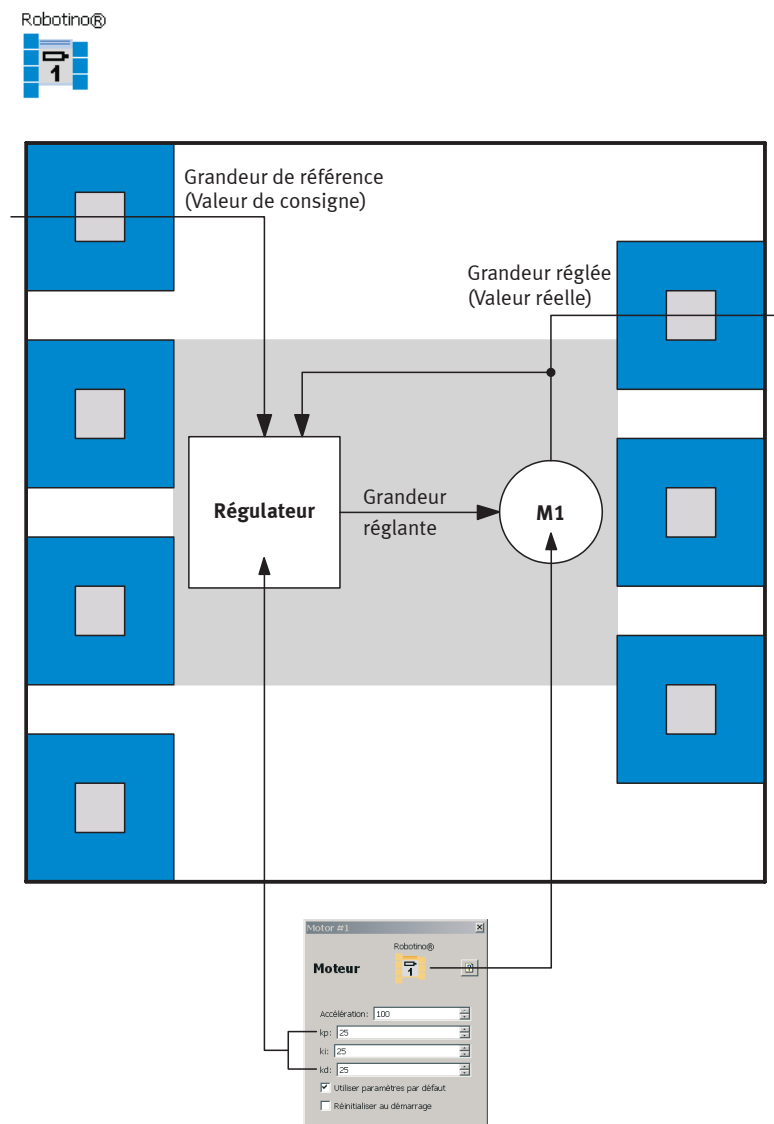
**Boucle de régulation**

La boucle de régulation comprend tous les composants de la boucle fermée nécessaires à la régulation automatique.



### Exemple de Robotino®

Le bloc de fonction **Moteur** contient un régulateur logiciel pour la régulation de la vitesse du moteur.



La grandeur de référence  $W$  du régulateur est alors identique à la vitesse de consigne  $x$  du moteur.

- Grandeur réglée = vitesse réelle du moteur  
La mesure est assurée par le codeur du moteur.  
La fonction du régulateur est de minimiser l'écart de régulation, c.-à-d. la différence entre la valeur réelle et la grandeur de référence.

De nombreux essais ont montrés qu'avec les valeurs

$k_p = 25$

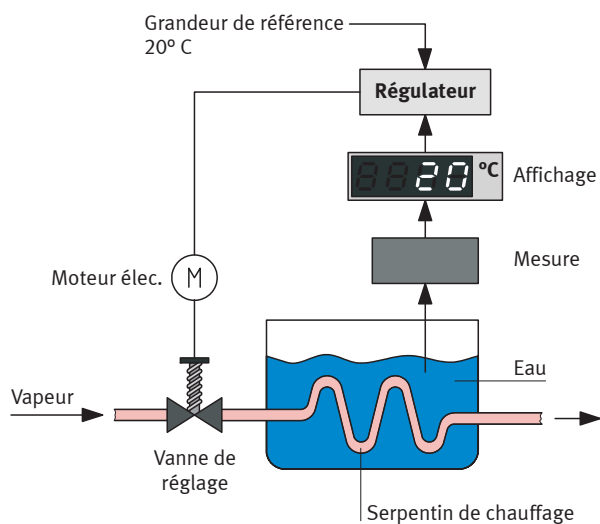
$t_i = 25$

$t_d = 25$

on obtient un comportement du régulateur du moteur très satisfaisant.

### Exemple

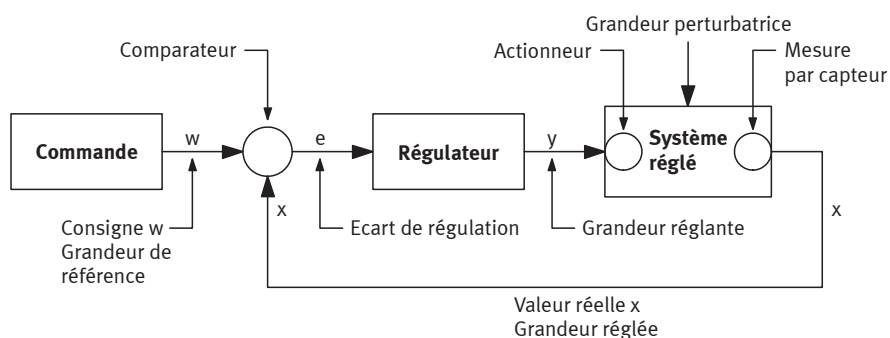
Le régulateur délivre un signal à l'organe de réglage en fonction de l'écart de régulation. Si l'écart est grand dans le sens négatif, c'est-à-dire si la valeur mesurée pour le débit est supérieure à la valeur prescrite (grandeur de référence), l'organe de réglage ferme un peu plus le limiteur. Si l'écart est grand dans le sens positif, c'est-à-dire si la valeur mesurée pour le débit est inférieure à la valeur prescrite (grandeur de référence), l'organe de réglage ouvre un peu plus le limiteur.



L'asservissement de la grandeur de sortie n'est généralement pas optimal :

- Si l'intervention est rapide et brutale, le système est trop excité à l'entrée. Il en résulte alors des fluctuations en sortie.
- Si l'intervention est lente et faible, la grandeur de sortie ne suit qu'approximativement l'évolution désirée.

Des systèmes (réglés) différents exigent en outre des stratégies de régulation différentes. Les systèmes comportant de grands retards doivent être pilotés avec précaution et anticipation. Nous avons ainsi esquissé les problèmes de la régulation et la mission de l'automaticien.



S'il faut concevoir une régulation pour une grandeur rencontrée dans une installation, les étapes nécessaires sont donc les suivantes :

- déterminer la grandeur réglante (ce qui définit le système réglé),
- déterminer le comportement du système réglé,
- trouver la stratégie de régulation du système réglé (comportement du système « régulateur »),
- sélectionner les organes de mesure et de réglage appropriés.

### **Exemple de régulation**

La désignation de commande de direction pour le manche à balai d'un avion n'est pas tout à fait correcte. Car elle ne sert pas à commander mais à réguler l'avion. Cette régulation fonctionne ainsi :

Si l'on veut effectuer un virage, on régule avec la commande de direction la direction de l'avion. On régule l'avion de sorte qu'il vole selon une trajectoire prédéfinie.

### **Systèmes réglés**

#### **Définition :**

La grandeur réglante et la grandeur réglée sont liées par des relations complexes. Ces relations sont le résultat des corrélations physiques entre les deux grandeurs. La partie qui décrit ces relations physiques et intéresse la régulation est appelée système réglé ou tout simplement système.

Le système réglé est la partie de la machine ou de l'installation dans laquelle la grandeur réglée doit être amenée à la valeur prescrite et au niveau de laquelle les grandeurs réglantes compensent les grandeurs perturbatrices. Un système réglé a non seulement la grandeur réglante comme grandeur d'entrée, mais aussi d'autres grandeurs d'entrée constituées des grandeurs perturbatrices.

Pour définir un régulateur convenant à un système réglé, il faut d'abord connaître le comportement ou la réponse du système réglé. L'automaticien ne s'intéresse pas aux interactions technologiques se déroulant à l'intérieur du système réglé ; il s'intéresse exclusivement au comportement du système.

#### **Comportement temporel d'un système**

Un aspect particulièrement important pour l'automatique est le comportement temporel d'un système (également appelé réponse ou comportement dynamique). C'est l'évolution dans le temps de la grandeur de sortie (grandeur réglée) en cas de variations des grandeurs d'entrée. L'important, ici, est surtout le comportement en cas de variations de la grandeur réglante. L'automaticien doit toujours bien avoir à l'esprit que pratiquement tout système a un comportement dynamique spécifique.

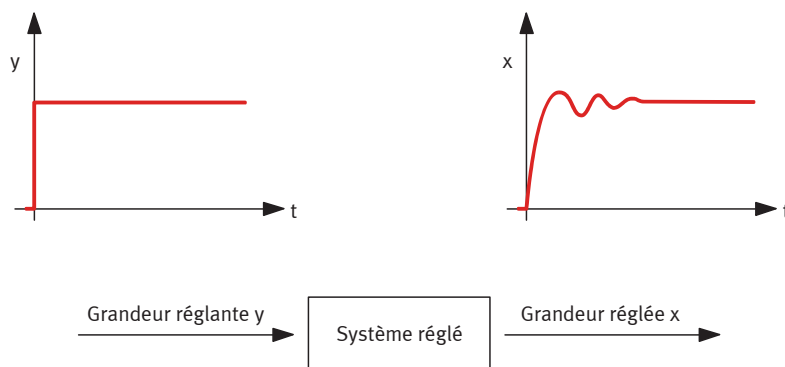
### **1.2 Description du comportement temporel de systèmes réglés**

#### **Réponse indicielle ou réponse à un échelon unité**

Le comportement d'un système en cas de variation de la grandeur d'entrée par échelon est appelé réponse indicielle ou réponse à un échelon unité. Cette réponse indicielle caractérise un système. Elle permet de décrire un système par des équations mathématiques.

### Comportement dynamique

Cette description d'un système est également appelée comportement dynamique. La figure illustre cette relation. La grandeur réglante  $y$  a été brusquement augmentée d'un échelon (voir diagramme ci-dessous). La réponse indicielle de la grandeur réglée  $x$  affiche un régime transitoire présentant quelques oscillations de courte durée avant de se stabiliser.



### État ou régime stationnaire

Une autre caractéristique d'un système est son comportement à l'état stationnaire ou comportement statique.

### Comportement statique

Le comportement statique d'un système est atteint quand aucune des grandeurs ne varie plus avec le temps. L'état stationnaire n'est donc atteint qu'à l'issue de toutes les évolutions du régime transitoire. Il peut se maintenir sur une durée quelconque.

Dans le comportement statique également, la grandeur de sortie dépend de la grandeur d'entrée. Cette dépendance est indiquée par la caractéristique du système.

## 1.3 Régulateur

Au chapitre précédent, nous avons examiné le système « réglé », c'est-à-dire la partie de l'installation qu'il s'agit de maîtriser par une régulation. Ce chapitre, lui, traite du régulateur.

Le régulateur est l'équipement de la boucle de régulation qui exécute la comparaison entre valeur mesurée (valeur réelle) et valeur prescrite (valeur de consigne) et qui, à partir du résultat, calcule et transmet la grandeur réglante.

Il est clairement apparu au chapitre précédent que les systèmes réglés ont des comportements très divers. Il existe des systèmes rapides, des systèmes à retard important et des systèmes à accumulation.

L'action sur la grandeur réglante doit être différente pour chacun de ces systèmes. D'où l'existence de régulateurs à comportements différents. La mission de l'automaticien est de déterminer le mode d'action optimal du régulateur pour un système donné.

### Mode d'action

On désigne par mode d'action la manière dont le régulateur doit déduire la grandeur réglante à partir de l'écart de régulation.

### Régulation PID de commande du moteur

L'industrie utilise essentiellement des régulateurs linéaires standard. Leur réponse indicielle résulte des actions P, I et D qui constituent les trois formes de base linéaires.

Le régulateur PID est le principal régulateur standard car il réunit les bonnes propriétés des autres types de régulateur et se distingue par une grande précision et rapidité. Il s'agit d'un régulateur à action proportionnelle, intégrale et dérivée. En cas de variation du signal par échelon, la grandeur réglante subit dans un premier temps l'action PD, puis l'action D disparaît tandis que l'action I croît en fonction du temps. Les grandeurs caractéristiques sont celles des actions du régulateur :

- Composante proportionnelle  $k_p$  du régulateur PID en amont du moteur
- Composante intégrale  $t_i$  du régulateur PID en amont du moteur
- Composante différentielle  $t_d$  du régulateur PID en amont du moteur

#### 1.3.1 Régulateur proportionnel

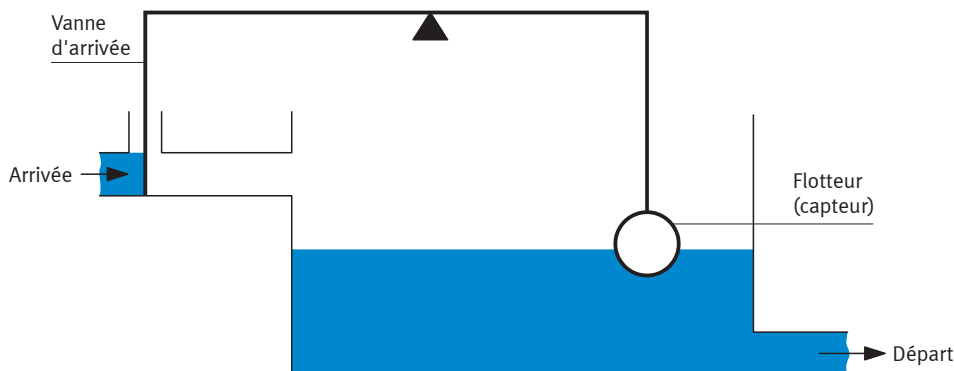
Dans le cas du régulateur à action proportionnelle, la grandeur réglante calculée est proportionnelle à l'écart de régulation. La grandeur réglante est d'autant plus grande que l'écart de régulation est important. La grandeur réglante est d'autant plus petite que l'écart de régulation est faible. Le comportement temporel du régulateur P est, dans l'état idéal, exactement le même que celui de la grandeur d'entrée. L'avantage dans ce cas, est qu'il intervient rapidement et sans retard.

#### Exemple de régulation de niveau

L'eau qui s'écoule dans le réservoir par la conduite d'arrivée, fait monter le flotteur. Ce dernier agit par le biais d'un levier sur la vanne d'arrivée. Si la consommation d'eau est importante, l'ouverture de la vanne doit être importante. Si la consommation d'eau est faible, l'ouverture de la vanne d'arrivée doit être faible.

Ceci signifie également qu'en cas de forte consommation d'eau, le niveau du réservoir d'eau est plus bas qu'en cas de faible consommation. C'est là l'inconvénient du régulateur proportionnel : Le niveau d'eau dans le réservoir varie en fonction de la grandeur perturbatrice Z.

Ces régulateurs sont généralement réalisés sous forme de circuit électronique.



### Domaine d'utilisation

Les régulateurs proportionnels sont mis en oeuvre lorsque les exigences de précision de la régulation ne sont pas élevées. Le régulateur P transforme un signal d'entrée en forme d'échelon en un signal de sortie en forme d'échelon. Il se caractérise par une réponse rapide.

- **Avantages**  
Les avantages du régulateur proportionnel sont sa rapidité et une architecture simple.
- **Inconvénient**  
Dans les boucles constituées de régulateurs proportionnels, il subsiste toujours un écart de régulation. La grandeur réglée (valeur réelle) n'atteint jamais la grandeur de référence (valeur de consigne).

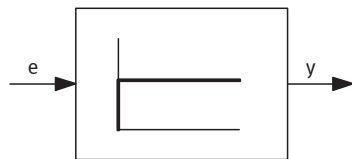
Ecart de régulation  $e$



Grandeur réglante  $y$



Symbole du régulateur P



Comportement temporel du régulateur P : Dans le cas d'un régulateur P, la grandeur réglante  $y$  réagit proportionnellement à l'écart de régulation  $e$ .

### 1.3.2 Régulateur intégral

Le régulateur intégral est d'autant plus effectif que l'écart de régulation dure longtemps. Même un écart de régulation très faible induit, s'il est présent suffisamment longtemps, un signal de sortie important. Il transforme, par sommation continue (intégration), des signaux d'entrée en forme d'échelon en signaux de sortie en forme de rampe.

En d'autres termes, les variations de la grandeur réglante sont continues et nettement plus lentes que dans le cas du régulateur proportionnel.

Si un signal constant est appliqué à l'entrée du régulateur intégral, la sortie évolue en continue jusqu'à ce que l'écart de régulation soit annulé. La grandeur réglante d'un régulateur intégral est proportionnelle à la surface écart de régulation-temps.

La grandeur réglante est d'autant plus grande que l'écart de régulation est important et sa durée longue. Dans le cas d'un régulateur intégral, l'écart de régulation et la vitesse de réglage de la grandeur réglante évoluent dans les mêmes proportions, plus l'écart de régulation est important, plus la vitesse de l'organe de réglage est grande.

L'utilisation exclusive de régulateurs intégraux est rare car ils tendent à être instables et ne réagissent que lentement aux changements rapides.

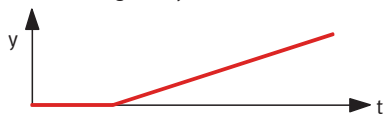
### Domaine d'utilisation

Ils sont cependant souvent utilisés pour supprimer l'inconvénient des régulateurs proportionnels, à savoir leur incapacité à annuler complètement l'écart de régulation. C'est la raison pour laquelle on les trouve souvent dans la pratique combiné à un régulateur proportionnel.

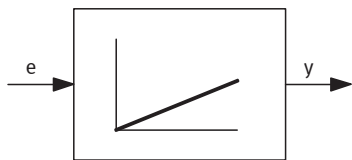
Ecart de régulation  $e$



Grandeur réglante  $y$



Symbole du régulateur I



Comportement temporel du régulateur I : Dans le cas d'un régulateur I, la grandeur réglante réagit proportionnellement à la surface de l'écart de régulation et du temps

### 1.3.3 Régulateur dérivé

Il existe cependant des systèmes régulés dans lesquels surviennent brusquement des grandeurs perturbatrices importantes. En peu de temps, la grandeur réglée s'écarte fortement de la grandeur de référence. Un régulateur à action dérivée permet de compenser de tels écarts.

La grandeur de sortie d'un régulateur à action dérivée est proportionnelle à la vitesse de variation de l'écart de régulation. Un écart en forme d'échelon génère une grandeur réglante infiniment grande à la sortie du régulateur.

### Domaine d'utilisation

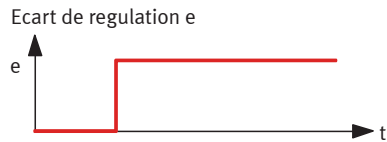
Le régulateur D ne réagissant qu'à l'évolution de l'écart de régulation, il n'est jamais utilisé seul. Il est toujours mis en oeuvre avec un régulateur P ou PI.

Un régulateur dérivé n'est cependant pas en mesure de compenser un écart de statisme. Un régulateur à action dérivée uniquement n'est pratiquement pas utilisable en technique.

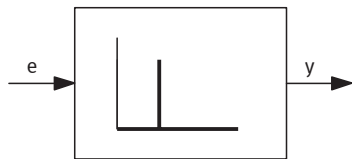
On utilise le régulateur dérivé en combinaison avec un régulateur proportionnel ou proportionnel intégral.

Le régulateur à action dérivée est d'autant plus effectif que la variation de l'écart de régulation est rapide.





Symbole du régulateur D

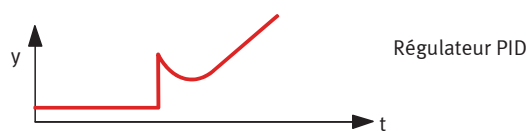
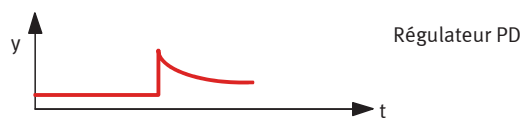
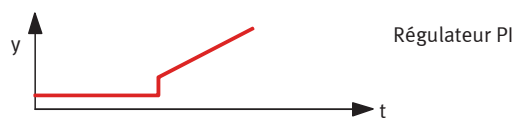


Comportement temporel du régulateur D : Dans le cas d'un régulateur D, la grandeur réglante réagit proportionnellement à l'évolution de l'écart de régulation.

### 1.3.4 Régulateurs combinés

Les divers types de régulateur présentant souvent des comportements indésirables face à une fonction de régulation, on les combine. Il y a cependant des combinaisons des trois types de régulateur qui ne sont pas judicieuses. Les combinaisons les plus courantes sont :

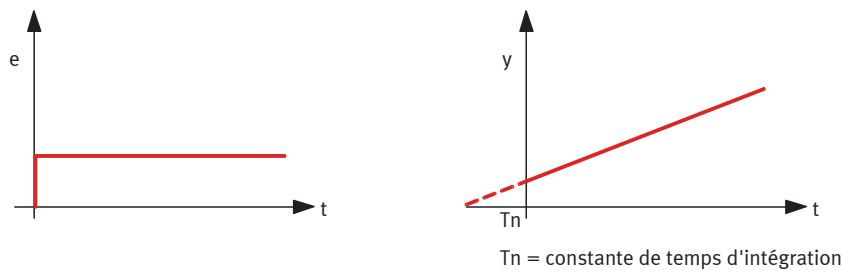
- Régulateur PI
- Régulateur PD
- Régulateur PID



### Régulateur PI

Le régulateur PI se compose de l'addition des modes d'action des régulateurs I et P. Il est ainsi possible de profiter des avantages des deux types de régulateurs : rapidité de réaction et annulation de l'écart de statisme. Le régulateur PI peut donc s'utiliser dans de très nombreux systèmes réglés.

En plus du gain proportionnel, intervient dans ce cas une autre grandeur caractéristique du comportement de l'action I : la constante de temps d'intégration, appelée aussi temps de dosage d'intégration. Elle indique avec quelle rapidité le régulateur, en cas d'écart de statisme, corrige la grandeur réglée pour annuler l'écart de statisme – en plus de la grandeur réglante générée par l'action P. La constante de temps d'intégration est la durée dont le régulateur PID est plus rapide que le régulateur PI.



### Régulateur PID

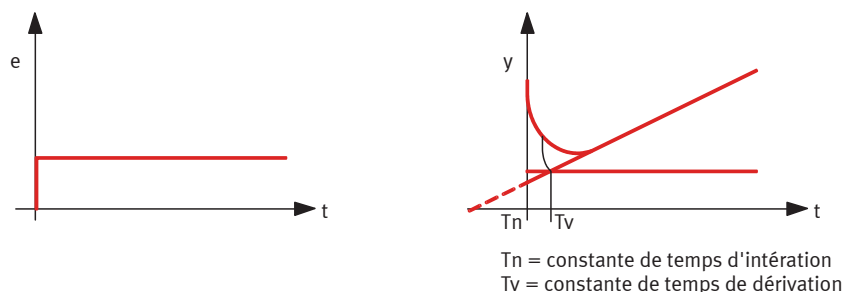
En plus des propriétés citées pour le régulateur PI, le régulateur PID comprend en outre l'action dérivée. Il tient donc également compte de la vitesse de variation de l'écart de régulation.

Si l'écart augmente beaucoup, l'action dérivée assure d'abord une brève surélévation extrême de la grandeur réglante. Tandis que l'influence de l'action dérivée redécroît immédiatement, l'action intégrale, elle, croît lentement. Si l'écart varie peu, l'effet de l'action dérivée est négligeable.

- **Avantage**  
L'avantage de ce mode d'action est de réagir plus rapidement à l'apparition de variations ou de grandeurs perturbatrices et de corriger ainsi plus vite l'écart de régulation.
- **Inconvénient**  
L'inconvénient est que la boucle de régulation peut entrer beaucoup plus vite en oscillation et que le réglage correct est donc beaucoup plus difficile.

### Constante de temps de dérivation

Du fait de l'action D, ce type de régulateur est plus rapide qu'un régulateur P ou PI. Ceci s'exprime dans la constante de temps de dérivation  $T_v$ . La constante de temps de dérivation est la durée dont le régulateur PID est plus rapide que le régulateur PI.



Conclusion Type de régulateur	Comportement temporel	Propriétés
Régulateur P		Pour faibles exigences en matière de grandeur réglante. Il régle rapidement, mais n'est pas en mesure de compenser intégralement un écart de régulation.
Régulateur I		Il régle lentement, l'écart de régulation peut être entièrement compensé. En cas de modification importante de la grandeur perturbatrice, le régulateur intégral tend à produire des oscillations.
Régulateur D		Il ne réagit qu'à une évolution de l'écart de régulation. N'est jamais utilisé seul.
Régulateur PI		Les régulateurs proportionnels sont souvent dotés d'une faible dose d'action intégrale. Il est ainsi possible de compenser intégralement l'écart de régulation. Il s'agit d'une combinaison fréquemment utilisée.
Régulateur PD		Combinaison rarement utilisée. Il se prête aux régulations devant réagir rapidement à de grandes variations de la grandeur perturbatrice.
Régulateur PID		Utilisé pour satisfaire à des exigences élevées en matière de système de régulation. L'action proportionnelle assure une régulation rapide, l'action intégrale garantit une grande précision et l'action dérivée accroît la vitesse de régulation.

### 1.3.5 Structure et paramétrage du régulateur

Les régulations techniques font partie intégrante des systèmes d'automatisation, dont la mission prioritaire réside dans la stabilisation des process. Elles s'utilisent dans le but

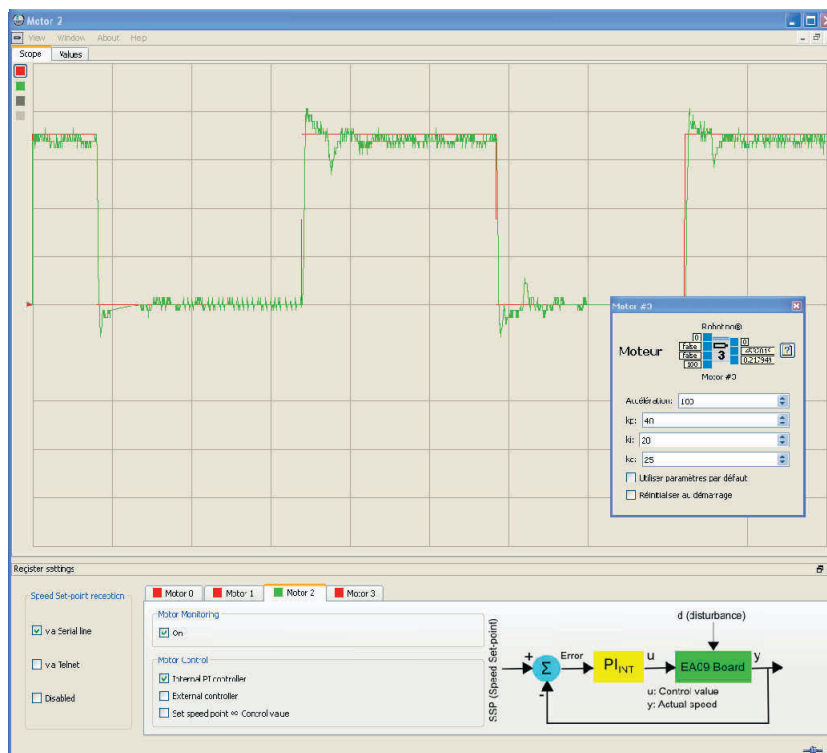
- d'amener le process dans certains états (modes de fonctionnement) et l'y maintenir automatiquement
- d'éliminer l'effet de perturbations sur le déroulement du process et
- d'empêcher ainsi les couplages indésirables d'opérations dans le process.

#### Dimensionnement par essais

S'agissant d'un système simple, cette méthode de dimensionnement des différentes actions est particulièrement opportune ici. On procède d'abord au paramétrage non critique des actions  $k_p$ ,  $t_i$  et  $t_d$ . Ceci s'obtient en choisissant une action  $k_p$  la plus faible possible et en mettant les autres actions à zéro ( $k_p$  faible,  $t_d=0$  et  $t_i=0$ ).

On augmente ensuite lentement l'action  $k_p$  (gain) jusqu'à obtenir un mauvais amortissement.

#### Exemple de Robotino® View



Paramétrage du régulateur PID

Sous Robotino® View (au moyen de EA09View), il est facile de réaliser la régulation de vitesse d'un moteur à courant continu. Le dimensionnement des actions  $k_p$ ,  $k_i$  et  $k_d$  s'obtient par le réglage des curseurs.

**Mauvais amortissement**

On obtient un mauvais amortissement lorsque l'oscillation diminue → Excursion d'une oscillation.

S'il en résulte une tendance au pompage, il faut à nouveau réduire l'action  $k_p$ . On règle ensuite l'action I en augmentant progressivement sa valeur par tâtonnement jusqu'à obtenir un résultat à peu près satisfaisant. Si le résultat n'est toujours pas satisfaisant, on peut y rajouter une proportion d'action dérivée. L'action dérivée permet de stabiliser la régulation. Si c'est le cas, on peut de nouveau augmenter les action  $k_p$  et  $t_i$ . Et ainsi de suite jusqu'à ce que le résultat soit définitivement satisfaisant.

Cette méthode pratique, très courante, de détermination des paramètres de régulation n'aboutit pas toujours à l'optimum. Ce résultat est cependant largement suffisant pour ce système.

D'autres méthode de réglage des paramètres du régulateur sont le dimensionnement par :

- règles de paramétrage
- la méthode fréquentielle
- la réponse indicielle
- le diagramme de Bode

