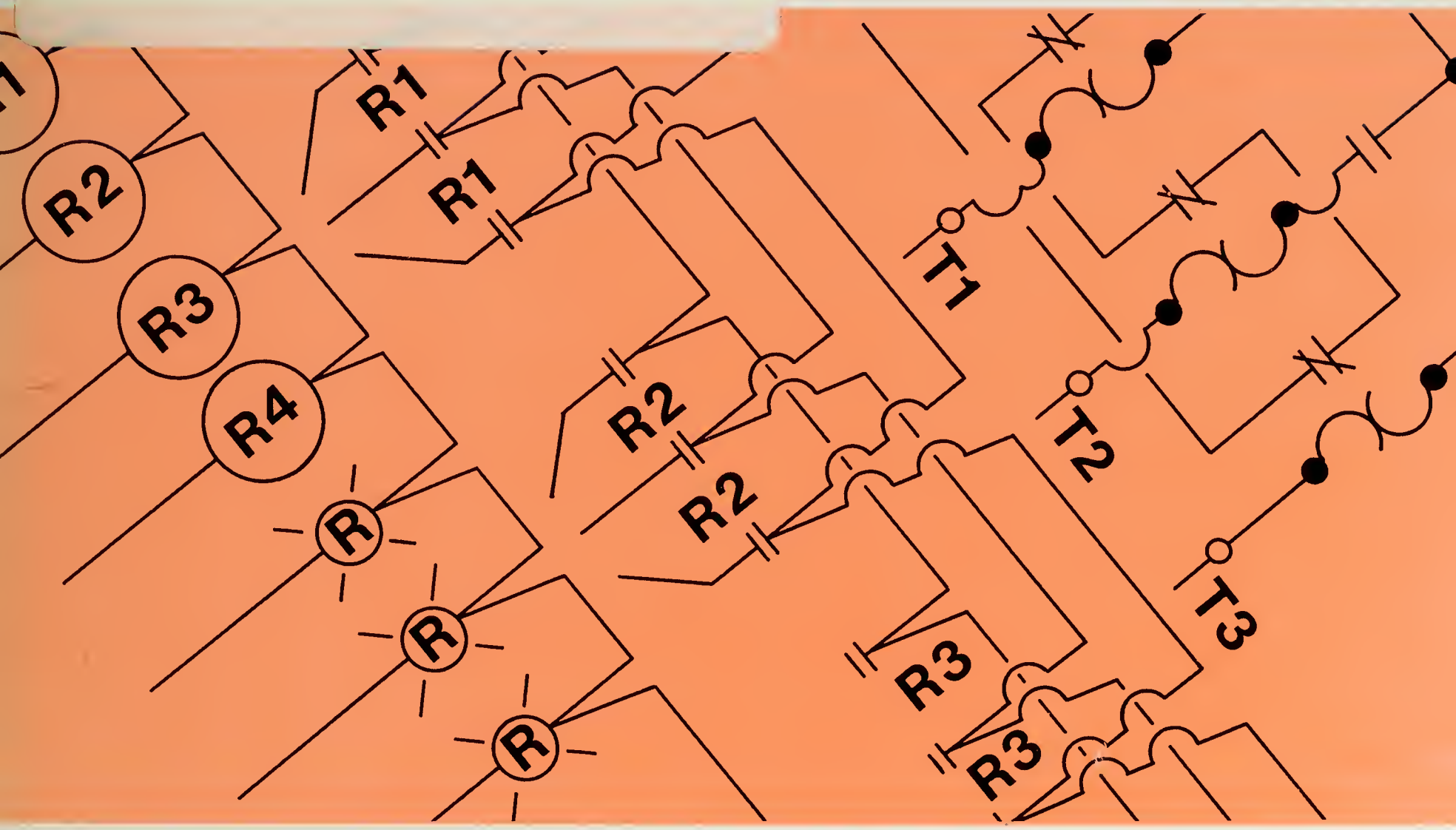
Agriculture Canada

# Manutention de produits agricoles

# *Instruments et appareils de régulation électrique*

AGRICULTURE CANADA
CODE APR AVR 9 1990 NO.
c 3
LIBRARY/BIBLIOTHEQUE OTTAWA K1A 0C5




Canada

Digitized by the Internet Archive
in 2012 with funding from
Agriculture and Agri-Food Canada – Agriculture et Agroalimentaire Canada

http://www.archive.org/details/manutentiond00hesl

# Manutention de produits agricoles

# *Instruments et appareils de régulation électrique*

Direction générale de la recherche
Agriculture Canada

Publication 1840/F
1990

©Approvisionnements et Services Canada, 1990
Nº de cat. A15-1840/1990F
ISBN 0-660-92756-X
Imprimé en 1990

En vente au Canada par l'entremise
de nos agents libraires agréés
et autres libraires, ou par la poste au

Centre d'édition du gouvernement du Canada
Approvisionnements et Services Canada
Ottawa (Ontario) Canada K1A 0S9

Prix sujet à changement sans préavis

Déjà publié en anglais sous le titre
*Canadian Agricultural Materials Handling Manual*
5.1 *Electrical Controls and Instrumentation*
Agric. Can. Publ. 5002

**Données de catalogage pour le Canada**

Manutention de produits agricoles. Instruments et
appareils de régulation électrique

(Publication ; 1840)

Publ. aussi en anglais sous le titre : Handling agricultural
materials, electrical controls and instrumentation.

Préparé par UMA Engineering Ltd. Cf. Av.-pr.
Comprend des références bibliogr.
No. de cat. A15-1840/1990F
0-660-92756-X

1. Régulateurs électriques. 2. Convertisseurs
électriques. 3. Machines agricoles–Equipement
électrique. I. Rousseau, Normand, 1951-
II. Heslop, L. III. UMA Engineering Ltd.
IV. Canada. Agriculture Canada. Direction générale
de la recherche. V. Collection: Publication (Canada.
Agriculture Canada). Français ; 1840.

TK2796.H314 1990 621.31'042E20 C89-099313-4

**Rédacteur–éditeur**
Normand Rousseau
Service aux programmes de recherche

**Conseiller scientifique, recherche à contrat**
L. Heslop
Centre de recherches techniques et de statistique

# TABLE DES MATIÈRES


**Avant-propos** 5

1 **TERMES ET DÉFINITIONS** 7

1.1 **Contacts** 7
1.2 Contact ouvert au repos 7
1.3 Contact fermé au repos 7
1.4 Contact momentané 7
1.5 Contact maintenu 7
1.6 **Relais** 7
1.7 Relais de temporisation 7
1.8 Relais à verrouillage 7
1.9 Sélecteur pas à pas 7
1.10 **Contacteur** 7
1.11 **Disjoncteur à maximums** 7
1.12 **Démarreur** 7
1.13 **Système de régulation numérique** 8
1.14 **Système de régulation analogique** 8
1.15 **Signaux d'entrée** 8
1.16 **Signaux de sortie** 8
1.17 **Logique** 8
1.18 **Algorithme** 8
1.19 **Processeur programmable** 8
1.20 **Logiciel et matériel** 8
1.21 **Organe terminal** 8
1.22 **Variables réglées** 8
1.23 **Bande proportionnelle** 8
1.24 **Consigne** 8
1.25 **Point de repère** 8
1.26 **Écart** 8
1.27 **Stabilité** 9
1.28 **Codes de l'électricité** 9
1.29 **Définitions des coffrets** 9
1.30 CEMA, type 1 9
1.31 CEMA, types 4–9 9
1.32 CEMA, type 4 9
1.33 CEMA, type 4X 9
1.34 CEMA, types 5 et 12 9
1.35 CEMA, type 7 9
1.36 CEMA, type 13 10
1.37 **Lignes directrices sur le choix de l'équipement** 10
1.38 Application 10
1.39 Association canadienne de normalisation 10
1.40 Disponibilité 10
1.41 Soutien 10
1.42 Bon fonctionnement 10
1.43 **Types de circuits** 10
1.44 Circuits à action numérique 10
1.45 Circuits à action numérique et temporisation 11
1.46 Circuits à action flottante 11
1.47 Circuits à action proportionnelle 11
1.48 Circuits à action proportionnelle plus intégrale 11
1.49 Circuit à action proportionnelle avec intégrale et dérivée 11

2 **ÉLÉMENTS DE CONTRÔLE ET COMPOSANTS DES CIRCUITS LOGIQUES** 11

2.1 **Boutons-poussoirs et sélecteurs** 11
2.2 **Contacts ou capteurs de position/fin de course** 12
2.3 **Capteur de pression et pressostat** 12
2.4 **Capteurs ou contacts de proximité** 12
2.5 **Capteurs ou contacts de niveau** 12
2.6 Contacts à basculement 12
2.7 Contacts à flotteur 13
2.8 Contacts à conductivité 13
2.9 Contacts à ultrasons 13
2.10 Contacts à diaphragme 13
2.11 Contacts de couple 13
2.12 **Contacts thermiques** 13
2.13 Contacts à bilame 13
2.14 Contacts à tube capillaire 13
2.15 **Relais** 14
2.16 Relais à verrouillage 14
2.17 Relais de temporisation 14
2.18 Séquenceurs 14
2.19 **Commandes électromécaniques** 15
2.20 **Dispositifs de régulation analogique** 15
2.21 Dispositifs électromécaniques de régulation analogique 15
2.22 Dispositifs électroniques de régulation analogique 15
2.23 **Processeurs programmables** 16
2.24 Unité centrale 16
2.25 Mémoire 16
2.26 Circuits d'entrée 17
2.27 Circuits de sortie 17
2.28 Programmeur 17
2.29 **Logiciel** 17
2.30 **Documentation** 17

3 **MESURE DES ÉLÉMENTS DU PROCÉDÉ** 18

3.1 **Dispositifs de mesure du niveau** 18
3.2 **Débitmètres** 18
3.3 Débitmètres à mesure de pression 18
3.4 Débitmètres électromagnétiques 19
3.5 Débitmètres à mesure de vitesse 19

3.6 Débitmètres volumétriques 19
3.7 Débitmètres à ultrasons 19
3.8 Débitmètres à vortex 19
3.9 Débitmètres à mesure de force-déplacement 20
3.10 Débitmètres massiques 20
3.11 **Transmetteurs de pression** 20
3.12 **Capteurs de température** 20
3.13 Capteurs thermoélectriques 20
3.14 Capteurs thermorésistifs 21
3.15 Capteurs à tube plein 21
3.16 Capteurs à circuit intégré 21
3.17 **Mesure de la puissance** 21
3.18 **Capteurs de rotation** 21
3.19 **Capteurs de position** 22
3.20 **Capteurs d'humidité relative** 22

4 CONVERTISSEURS DE PHASE 22

5 COMMANDES DE RÉGLAGE DE VITESSE 22

6 COMMANDES DE MOTEURS 23

6.1 **Disjoncteurs à maximums** 23
6.2 **Démarreurs manuels** 24
6.3 **Démarreurs électromagnétiques** 24
6.4 **Démarreurs inverseurs** 24
6.5 **Démarreurs à tension réduite** 24
6.6 Démarreurs étoile–triangle 24
6.7 Démarreurs à autotransformateur 24
6.8 Démarreurs à résistance primaire 25
6.9 Démarreurs à enroulement partiel 25
6.10 Démarreurs à semi-conducteurs 25
6.11 Démarreurs à réglage de vitesse 25

7 EXEMPLES DE CIRCUITS DE COMMANDE 25

7.1 **Commandes de marche-arrêt de moteur** 25
7.2 **Circuits de temporisation** 25
7.3 Circuits à retard à l'amorçage 25
7.4 Circuits à retard au désamorçage 27
7.5 **Circuits d'alternance** 27
7.6 **Circuits de pas à pas** 28
7.7 **Circuits conditionneurs de signal** 29
7.8 **Circuits de commutation analogique** 29

8 SCHÉMAS DE CIRCUIT 30

8.1 **Ordinogrammes logiques** 30
8.2 **Schémas en échelle** 33
8.3 **Schémas de câblage** 36
8.4 **Schémas de boucle** 36
8.5 Boucle de régulation de température 37
8.6 Système de contrôle de température intérieure d'un silo 37

9 EXEMPLE DE PROBLÈME : CENTRE DE STOCKAGE ET DE PRÉPARATION D'ALIMENTS POUR LES ANIMAUX 40

9.1 **Description du procédé** 40
9.2 **Conception du système de régulation** 40
9.3 Définition des besoins du système 41
9.4 Lien utilisateur–machine 42
9.5 Description de la suite des opérations de régulation 42
9.6 Ordinogramme 42
9.7 Choix des éléments 43
9.8 **Schéma de principe** 43
9.9 **Conception du panneau de commande** 43
9.10 **Conclusion** 43

**Bibliographie** 44

**Liste des figures**

1 Commande de marche-arrêt de moteur 26
2 Circuit de dérivation de pompe. 26
3 Circuit de remise en marche 27
4 Circuit d'alternance 27
5 Circuit de sélecteur pas à pas 28
6 Circuit de conditionnement de signal (détecteur de température à résistance) 29
7 Câblage détaillé du circuit de signaux analogiques 30
8 Circuit de commande de l'élévateur à godets 31
9 Agencement des organes mécaniques du système du transporteur 31
10 Ordinogramme du système de transfert entre les silos 32
11 Symboles des schémas en échelle 33
12 Schéma de principe du système de régulation du transporteur 35
13 Schéma de câblage du démarreur 36
14 Schéma de principe de démarreur 37
15 Agencement des organes mécaniques de la soufflerie 38
16 Schéma de boucle de la soufflerie 38
17 Agencement des organes mécaniques des silos dans un système de contrôle de la température des silos 38
18 Schéma de boucle du système de surveillance de température des silos 39
19 Schéma de principe de l'agencement de l'équipement pour le centre de stockage et de traitement d'aliments 40

# AVANT-PROPOS

La publication *Manutention des produits agricoles* comprend plusieurs parties et c'est un guide rédigé à l'intention des concepteurs de systèmes de manutention des produits, tant pour le secteur agricole que pour les secteurs connexes. Chaque section traite du choix et de la conception de matériels de manutention et de transformation de produits. Les éléments décrits peuvent avoir à fonctionner d'une manière indépendante ou comme composantes d'un système. La conception d'un système peut nécessiter l'utilisation de renseignements tirés de plusieurs sections du manuel.

La présente section a été préparée par la UMA Engineering Ltd. de Winnipeg (Man.) pour le Comité canadien du génie rural qui fait partie du Comité de coordination des services agricoles du Canada.

# 1 TERMES ET DÉFINITIONS

Un système de régulation bien conçu et bien réalisé intègre les instruments de contrôle et de commande à l'appareil mécanique soumis au système de régulation ainsi qu'à l'opérateur humain du système. Ces trois aspects du système sont tellement interdépendants que le fait de négliger l'un ou l'autre des éléments réduit la capacité du système à jouer le rôle pour lequel il a été conçu.

Le présent ouvrage décrit certains aspects pratiques de la conception des systèmes de régulation ainsi que les pièges à éviter. Les concepteurs doivent comprendre la régulation du procédé, les limites du matériel, les méthodes de mesure des variables du procédé et les besoins de l'opérateur. La bibliographie donne la liste des ouvrages à consulter pour en savoir plus sur ces points.

La conception des systèmes de régulation fait appel à plusieurs termes importants qui sont définis ci-après.

## 1.1 Contacts

Partie d'un relais, d'un interrupteur, d'un commutateur ou d'un connecteur, le contact laisse passer le courant dans un circuit électrique. Le contact se fait ou se défait pour fermer ou ouvrir le circuit.

1.2 *Contact ouvert au repos* Le contact ouvert au repos ne conduit pas de courant quand il n'est pas actionné.

1.3 *Contact fermé au repos* Le contact fermé au repos conduit le courant quand il n'est pas actionné.

1.4 *Contact momentané* Le contact momentané, qui peut être ouvert ou fermé au repos, est actionné par une force extérieure. Parmi ces forces extérieures, on compte les contacts d'un relais, les boutons-poussoirs ou les sélecteurs à retour par ressort.

1.5 *Contact maintenu* Un contact maintenu demeure dans son dernier état (soit ouvert, soit fermé) jusqu'à ce qu'une force extérieure agisse sur lui. L'interrupteur d'éclairage ou le relais à verrouillage en sont des exemples.

## 1.6 Relais

Un relais est un dispositif électromagnétique dont les contacts s'ouvrent ou se ferment selon les changements qui surviennent dans l'état des circuits électriques connexes. L'état du relais, toutefois, affecte le fonctionnement des autres dispositifs dans le circuit électrique. Les contacts des relais sont considérés comme momentanés puisque leur action dépend de l'état sous tension ou non de la bobine du relais.

1.7 *Relais de temporisation* Le relais de temporisation actionne ses contacts après un temps donné.

1.8 *Relais à verrouillage* Un relais à verrouillage est un relais dont les contacts changent d'état lorsque le relais est mis sous tension, mais dont les mêmes contacts demeurent dans l'état atteint même si l'on coupe l'alimentation de la bobine. Le relais à verrouillage est doté d'une deuxième bobine, la bobine de réenclenchement, qui déverrouille les contacts à une autre moment.

1.9 *Sélecteur pas à pas* Un sélecteur pas à pas commande deux jeux de contacts ou plus dans un ordre prédéterminé. En établissant et en coupant tour à tour l'alimentation de la bobine de ce relais, on fait passer ses contacts d'une étape à l'autre de l'ordre donné. Habituellement, les contacts d'un sélecteur pas à pas demeurent dans leur dernier état jusqu'à ce qu'ils soient amenés à l'étape suivante.

## 1.10 Contacteur

Un contacteur est un relais ou un interrupteur dont les contacts peuvent porter de forts courants.

## 1.11 Disjoncteur à maximums

Le disjoncteur à maximums protège le moteur des trop forts courants pendant son fonctionnement. Le disjoncteur à maximums laisse passer un fort courant pendant un court instant au démarrage, moment où l'appel de courant est habituellement élevé. Cependant, si le courant élevé persiste, le disjoncteur à maximums coupe le circuit d'alimentation du moteur. Les disjoncteurs à maximums peuvent être réenclenchés automatiquement ou, plus couramment, manuellement.

## 1.12 Démarreur

Le démarreur est un jeu de contacts doté d'un dispositif de protection contre les surcharges. Le démarreur peut être manuel ou électromagnétique. Le dispositif de protection contre les surcharges d'un démarreur manuel coupe mécaniquement le circuit d'alimentation du moteur. Dans un démarreur électromagnétique, le dispositif de protection contre les surcharges coupe le circuit de la bobine du contacteur d'alimentation du moteur.

### 1.13 Système de régulation numérique

Si les signaux d'entrée et de sortie d'un système de régulation ne peuvent avoir que deux états—soit deux niveaux de tension, soit deux niveaux de courant—le système est réputé numérique.

### 1.14 Système de régulation analogique

Le système de régulation analogique se distingue par des signaux d'entrée et de sortie en constant changement. Les signaux analogiques ont les formes les plus diverses, dont un courant de 4 à 25 mA ou une tension de 1 à 5 V.

### 1.15 Signaux d'entrée

Le courant, la tension, la puissance ou toute autre force motrice appliqués à un circuit ou à un dispositif sont tous considérés comme des signaux d'entrée. Les signaux d'entrée peuvent être numériques ou analogiques.

### 1.16 Signaux de sortie

Les signaux de sortie sont un courant, une tension, une puissance ou une force motrice produits par un circuit ou un dispositif. Le signal de sortie produit par un système de régulation fait fonctionner un dispositif final comme un voyant, un moteur ou un robinet. Comme le signal d'entrée, le signal de sortie peut être numérique ou analogique.

### 1.17 Logique

Dans les systèmes de régulation, la logique désigne la structure de l'interdépendance des signaux dans un système de traitement automatique de données.

### 1.18 Algorithme

L'algorithme est l'ensemble des règles établies en vue de résoudre un problème dans un nombre donné d'étapes. Un exemple d'algorithme d'un système est l'instruction complète d'un traitement arithmétique visant à trouver la position d'un robinet pour obtenir un débit particulier.

### 1.19 Processeur programmable

Le processeur programmable remplace les séquenceurs, les minuteries et les relais classiques dans les appareils de régulation numérique et, plus récemment, analogique. Le processeur programmable applique la logique du relais classique qu'il remplace.

### 1.20 Logiciel et matériel

La logique et les algorithmes utilisés dans les processeurs programmables forment le logiciel. Le matériel comprend les dispositifs du système de régulation, les pièces mobiles aussi bien qu'immobiles.

### 1.21 Organe terminal

L'organe terminal—l'élément final de contrôle et de commande—est relié à l'entrée ou à la sortie d'un processeur ou d'un système de régulation.

### 1.22 Variables réglées

Les variables réglées sont soumises au contrôle ou à la commande de l'organe terminal. Habituellement, l'organe terminal mesure ou contrôle des variables réglées comme la température, la pression ou le débit.

### 1.23 Bande proportionnelle

La bande proportionnelle est l'ampleur du changement qui doit survenir dans la variable réglée pour déplacer d'une butée à l'autre l'actionneur de l'organe terminal.

### 1.24 Consigne

La consigne est la valeur réglée dans un processeur pour lui indiquer la valeur à laquelle on désire conserver la variable réglée.

### 1.25 Point de repère

Le point de repère est la valeur réelle de la variable contrôlée. Si le point de repère se trouve à l'intérieur de la bande proportionnelle du processeur, il est dit sous contrôle. Si le point de repère se trouve à l'extérieur de la bande proportionnelle, il est dit hors de contrôle.

### 1.26 Écart

L'écart est la différence entre la consigne et le point de repère. On l'appelle aussi le point de repère d'entrée.

1.27 **Stabilité**

La stabilité est la capacité d'un système de régulation à conserver la variable contrôlée à la consigne ou près de celle-ci sans que le processeur doive constamment passer d'un extrême à l'autre.

1.28 **Codes de l'électricité**

Les autorités locales chargées de l'inspection des installations électriques adoptent, de façon volontaire, le *Code canadien de l'électricité* (CCE) et le font appliquer. Des provinces et des organismes d'inspection locaux exigent souvent que le matériel respecte des exigences particulières en plus de celles du CCE. La plupart des autorités locales utilisent les normes de l'Association canadienne de normalisation (ACNOR). Les grands fabricants d'appareils de régulation obtiennent généralement l'approbation de l'Association canadienne de normalisation pour leurs produits.

Tous les divers codes de l'électricité visent à établir des normes d'installation et de maintenance des appareils électriques. Quand on choisit et exige un appareil, il faut veiller à ce qu'il soit conforme aux codes en vigueur dans la région ainsi qu'au CCE. De plus, il faut choisir, si possible, des appareils approuvés par l'Association canadienne de normalisation pour l'application visée.

La conception de systèmes destinés aux emplacements dangereux exige que l'on porte une attention particulière aux normes et aux codes de l'électricité pertinents. Le CCE décrit comme suit les emplacements dangereux :

les aires dans lesquelles il y a danger d'incendie ou d'explosion du fait que :

1. *des gaz hautement inflammables, des mélanges de liquides volatils inflammables ou d'autres substances hautement inflammables y sont produits, utilisés ou entreposés dans des contenants autres que leurs contenants originaux*
2. *des poussières combustibles sont susceptibles de s'y trouver en quantités suffisantes pour produire un mélange explosif ou combustible, ou bien qu'il est pratiquement impossible d'empêcher ces poussières de s'accumuler sur les moteurs ou les appareils électriques, ou à l'intérieur de ces appareils et moteurs, en quantité suffisante pour en provoquer le chauffage excessif en empêchant le rayonnement normal de la chaleur, ou qu'il est impossible d'empêcher la poussière de s'accumuler sur les tubes fluorescents*
3. *des fibres facilement inflammables des particules libres combustibles y sont produites, manutentionnées ou utilisées librement, ou*
4. *des fibres facilement inflammables ou des matières produisant des poussières combustibles sont entreposées en balles ou dans des contenants, mais n'y sont pas produites ou manutentionnées librement.*

1.29 **Définitions des coffrets**

Les paragraphes suivants définissent les diverses catégories de boîtes et de coffrets d'appareils électriques, conformément aux prescriptions de la Canadian Electrical Manufacturer's Association (CEMA). Cette liste donne aussi le genre d'endroit où chaque coffret doit être utilisé (selon le CCE).

1.30 *CEMA, type 1* Coffret d'utilisation courante à l'intérieur, en atmosphère normale.

1.31 *CEMA, types 4–9* Utiliser ces coffrets dans les endroits où il faut des appareils étanches. Ils conviennent aussi dans les concasseurs à charbon ou les minoteries et dans les autres endroits où sont produites des poussières dangereuses. Les coffrets sont faits d'acier inoxydable et les couvercles sont fermés hermétiquement grâce à un joint d'étanchéité en caoutchouc synthétique.

1.32 *CEMA, type 4* Ces coffrets sont utilisés dans les laiteries, les usines de transformation des aliments, les brasseries, les tanneries, les stations de pompage, à l'extérieur ou dans d'autres endroits où les appareils sont soumis aux éclaboussures ou à une forte humidité. Le couvercle est rendu étanche par un joint approprié.

1.33 *CEMA, type 4X* Ce coffret en polyester renforcé de fibres de verre est étanche et résiste à la corrosion. Un joint en caoutchouc synthétique entre la base et le couvercle assure efficacement l'étanchéité. Les coffrets 4X sont surtout utilisés dans les usines de produits chimiques et les usines de papier.

1.34 *CEMA, types 5 et 12* Ces coffrets sont utilisés dans les ateliers d'usinage du métal, dans les usines de transformation industrielle et dans les endroits dangereux. Le couvercle, garni d'un joint d'étanchéité en caoutchouc synthétique, résiste aux éclaboussures d'huile, aux liquides de refroidissement, aux alésures métalliques, à la saleté ou aux charpies.

1.35 *CEMA, type 7* Conçu en vue d'utilisation dans les endroits susceptibles d'être envahis par des gaz dangereux, ce coffret est fait de métal moulé et boulonné. Ce type de coffret est conforme aux exigences du CCE visant les

endroits des groupes C et D de la classe I. Une large bride usinée est placée entre le couvercle et la base.

1.36 *CEMA, type 13* Étanche à l'huile et à la poussière, ce coffret protège son contenu contre les éclaboussures d'eau, d'huile et de liquide de refroidissement. Il est aussi imperméable aux infiltrations et à la condensation externe. On l'utilise à l'intérieur principalement pour les dispositifs de pilotage comme les contacts de fin de course, les boutons-poussoirs, les sélecteurs ou les voyants.

### 1.37 Lignes directrices sur le choix de l'équipement

Les lignes directrices suivantes guident le choix de l'équipement de contrôle et de commande :

- application
- cote de l'Association canadienne de normalisation
- disponibilité
- soutien
- bon fonctionnement.

1.38 *Application* La plupart des fabricants d'appareils de régulation de procédé industriel offrent des gammes complètes d'appareils de régulation de diverses grosseurs, en diverses formes et sous divers coffrets. On peut se procurer des catalogues de divers fabricants et choisir les dispositifs appropriés des vastes gammes de produits offerts. Il faut s'appuyer sur les recommandations du fabricant ainsi que sur les critères de conception et de sécurité.

1.39 *Association canadienne de normalisation* On doit porter une attention particulière à la cote d'approbation de l'Association canadienne de normalisation afin de s'assurer que l'équipement choisi convient bien à l'application. Ainsi, un contact ou un capteur peut être approuvé pour un endroit non dangereux, mais ne pas convenir pour des endroits où il y a de la poussière de grains.

1.40 *Disponibilité* Certains appareils peuvent convenir à une application. Cependant, il peut être difficile de se les procurer. Des dispositifs spécialisés comme les capteurs de vitesse, d'humidité ou de niveaux à ultrasons et les contrôleurs électroniques se retrouvent dans cette catégorie puisqu'il n'est pas facile de les remplacer par les appareils d'un autre fabricant.

1.41 *Soutien* On ne doit pas utiliser d'appareils de régulation spécialisés à moins que les préposés à la maintenance puissent obtenir un bon soutien technique. Dans la plupart des régions, au moins quelques fournisseurs d'équipements offrent ce genre de soutien; il faut choisir entre les équipements qu'ils offrent.

1.42 *Bon fonctionnement* Avant de choisir un appareil en particulier, on peut communiquer avec des personnes qui utilisent cet appareil afin de savoir s'il fonctionne bien. Il faut aussi vérifier dans quelle mesure l'utilisateur est satisfait du fournisseur et du fabricant. On peut ainsi s'éviter bien des peines.

### 1.43 Types de circuits

De façon générale, les systèmes de régulation de procédés industriels reposent sur six types de circuits fondamentaux :

- circuits à action numérique, ou «tout ou rien»
- circuits à action numérique et temporisation
- circuits à action flottante
- circuits à action proportionnelle
- circuits à action proportionnelle plus intégrale
- circuits à action proportionnelle plus intégrale plus intégrée.

Les circuits à action numérique, à action numérique et temporisation, et à action flottante font appel au matériel de commande électromécanique. Les circuits à action proportionnelle agissent sur du matériel de commande électromécanique analogique. Les autres circuits fonctionnent avec du matériel électronique de commande analogique. Le processeur programmable peut remplir toutes les fonctions énumérées ci-dessus.

1.44 *Circuits à action numérique* La régulation à action numérique exige habituellement la mise en marche et l'arrêt des divers organes du procédé. Les obturateurs, vannes, transporteurs, distributeurs à vis, appareils de chauffage fonctionnent habituellement de cette façon. La fermeture (ou l'ouverture) de divers contacts et relais transmet les signaux d'entrée au système de régulation. Les contacts sont actionnés par des minuteries, par la mesure d'éléments du procédé (par exemple, une trémie pleine ou vide, les températures maximale et minimale) ou par l'opérateur humain.

On peut utiliser des schémas en échelle pour la conception des programmes de régulation en tout ou rien. Ces schémas montrent chaque élément du procédé ainsi que les conditions qui entraînent le branchement des éléments à l'alimentation. La section 8.2 explique plus en détail les schémas en échelle.

1.45 *Circuits à action numérique et temporisation* Ces circuits réduisent le différentiel en réduisant artificiellement la durée des périodes de marche et d'arrêt en prévision de la réaction du système. Ainsi, un thermostat de commande de chauffage peut être doté d'un fil chauffant interne qui est sous tension en même temps que l'organe terminal; le thermostat reçoit donc un faux signal de ce fil chauffant. Ce dernier provoque l'arrêt du thermostat avant que la température du système se stabilise à la valeur de consigne. Le fil chauffant fonctionne de cette manière pour éviter la hausse excessive de la température de certains points du système ou parce que des calculs ont indiqué que le système se stabilise de lui-même peu de temps après la coupure du circuit par le thermostat. Cette technique s'appelle «anticipation de chaleur».

1.46 *Circuits à action flottante* Les circuits à action flottante peuvent s'arrêter et faire marche arrière en tout point de leur plage de commande. Dans une bande neutre, ou fourchette, le processeur ne transmet pas de signal, ce qui laisse l'organe commandé flotter en position partiellement ouverte. Pour assurer un bon fonctionnement, un système possédant un circuit de ce genre doit cependant réagir rapidement à la variable contrôlée, sinon il ne pourra pas s'arrêter à un point intermédiaire.

La pression de refoulement de la pompe est régularisée par deux contacts à pression et par une manette des gaz entraînée par un moteur électrique inversible. Le contact de haute pression fait tourner en marche arrière le moteur électrique de la manette des gaz, tandis que le contact de basse pression le fait tourner dans l'autre sens. Il y a une bande neutre entre la consigne du contact de haute pression et celle du contact de basse pression.

1.47 *Circuits à action proportionnelle* Les circuits à action proportionnelle ajoutent la rétroaction à l'action flottante. La rétroaction veille à ce que l'actionneur du dispositif commandé se déplace juste assez pour contrer le changement survenu dans la variable contrôlée. La réaction de la variable contrôlée n'est pas nécessaire.

Ce genre de circuit de commande peut être utilisé dans des applications comme la régulation du niveau où la réaction de la variable contrôlée est relativement lente.

La régulation à action proportionnelle peut aussi être appelée régulation à action progressive. Somme toute, la régulation à action flottante est, à proprement parler, une régulation à action progressive.

1.48 *Circuits à action proportionnelle plus intégrale* Un circuit à action proportionnelle plus intégrale—ou à action proportionnelle avec compensation de retard de réponse—remet automatiquement le point de repère à la consigne originale chaque fois qu'il se produit un écart. L'action intégrale augmente le gain du contrôleur à mesure que la vitesse du changement du point de repère augmente. Cette action accélère le retour du point de repère à la consigne originale et assure la régulation de la variable réglée avec plus de précision que tout autre circuit. Une large bande proportionnelle accroît la stabilité du système.

1.49 *Circuit à action proportionnelle avec intégrale et dérivée* L'ajout de l'action dérivée à un circuit à action proportionnelle permet d'obtenir une vitesse de correction de consigne égale à la vitesse de changement de l'erreur. Ce genre de régulation trouve son efficacité dans les systèmes dont l'inertie nuit à la précision de la régulation.

La régulation à action proportionnelle avec intégrale et dérivée peut être précieuse, par exemple, dans un système de régulation du niveau de liquide dans un réservoir dont la sortie est variable tout comme la commande de l'arrivée de liquide. Un circuit de ce genre permet d'augmenter le débit de liquide à l'entrée à mesure que le niveau du liquide s'éloigne du point de repère du niveau.

## 2 ÉLÉMENTS DE CONTRÔLE ET COMPOSANTS DES CIRCUITS LOGIQUES

Les circuits logiques font appel à des éléments contrôlés afin de déterminer si des événements se sont produits. Ces éléments de contrôle réagissent soit aux actions de l'opérateur humain du système, soit aux changements qui surviennent dans le procédé soumis à la régulation.

### 2.1 Boutons-poussoirs et sélecteurs

Les boutons-poussoirs et les sélecteurs—des dispositifs manuels actionnés par l'opérateur du système—modifient l'action de la régulation. Selon les besoins de la logique, les boutons, les contacts ou les interrupteurs peuvent être maintenus, momentanés, fermés au repos, ouverts au repos, ou d'une combinaison de ces fonctions. Les boutons, interrupteurs et contacts peuvent être actionnés depuis les organes de contrôle, depuis le poste de commande, ou depuis les deux.

## 2.2 Contacts ou capteurs de position/fin de course

Les contacts de position et de fin de course fournissent les signaux d'entrée des systèmes de régulation logique. Ils fournissent l'information concernant la position des vannes, des obturateurs et des autres appareils mécaniques. De plus, selon la logique du système, ces contacts autorisent ou interdisent la réaction du système.

Habituellement, ces contacts n'indiquent qu'un des deux états possibles de l'organe contrôlé: entièrement ouvert ou entièrement fermé. Si le système de régulation doit connaître les deux états, ouvert et fermé, il faut utiliser plusieurs contacts. Des schémas de contrôle devraient illustrer l'action de contrôle des contacts de fin de course. Le schéma pourrait indiquer, par exemple, que le contact se ferme quand l'obturateur s'ouvre.

## 2.3 Capteurs de pression et pressostats

Les pressostats sont raccordés directement au circuit du procédé et réagissent à des pressions préétablies. Il y a deux types de pressostats :

- à différentiel fixe
- à différentiel réglable.

Le pressostat à différentiel fixe fonctionne à une valeur de pression particulière. Quand il détecte cette pression, le contact du pressostat passe d'un état à l'autre, d'ouvert à fermé, par exemple. La valeur de la pression à laquelle le contact reprend son état original dépend de la pression différentielle réglée en usine. Ce réglage se situe habituellement sur une petite bande.

Le pressostat à différentiel réglable peut être réglé de façon à fonctionner à des pressions et à des différentiels différents. Les pressostats de ce genre peuvent changer l'état de leurs contacts puis revenir à leur état normal à différentes pressions déterminées par l'utilisateur.

Les pressostats établissent ou rompent leurs contacts avec la hausse ou la baisse de la pression. Dans le cas des pressostats à différentiel réglable, il faut déterminer quelles seront la hausse et la baisse de pression puis régler le contact en conséquence. Le schéma logique illustre ces deux actions de contrôle. Par exemple, le schéma peut préciser que le contact se ferme quand la pression à la hausse atteint 350 kPa.

Les pressostats fonctionnent en deux modes différents. Ils peuvent avoir une influence directe sur le procédé, dans le cas d'un compresseur à air ou du système de régulation de la pompe d'un puits. Ils peuvent aussi alimenter en signaux logiques un système de régulation logique en vue d'assurer la fermeture d'urgence d'une installation en cas de sur-pression ou de sous-pression.

## 2.4 Capteurs ou contacts de proximité

En général, les contacts de proximité jouent le même rôle qu'un contact de position ou de fin de course. Les tout nouveaux contacts de proximité sans contact physique peuvent déterminer la position d'une vanne ou d'un obturateur sans aucun lien mécanique. Ils conviennent particulièrement bien aux environnements hostiles.

## 2.5 Capteurs ou contacts de niveau

Les contacts de niveau réagissent au niveau des liquides ou des solides dans un réservoir et actionnent des contacts afin de conserver le niveau à l'intérieur de limites établies. Les capteurs et contacts de niveau peuvent fonctionner avec ou sans contact physique.

Il y a deux groupes de capteurs et de contacts de niveau :

- niveau des liquides
- niveau des solides.

Dans tous les cas, il faut indiquer sur les schémas logiques les points d'entrée en fonction ainsi que l'action déclenchée, pour chacun. Par exemple, le schéma pourrait préciser que le contact se ferme à 2 m de niveau à la hausse.

Il y a quatre types de contacts et de capteurs de niveau :

- à basculement
- à flotteur
- à conductivité
- à ultrasons.

Les capteurs et contacts de niveaux pour les solides déterminent la profondeur des solides comme les grains dans des silos. Les plus courants sont :

- à diaphragme
- de couple
- à ultrasons.

Suit la description de capteurs et contacts de niveaux tant de liquides que de solides.

2.6 *Contacts à basculement* Les contacts de niveau de ce genre consistent en une capsule de plastique contenant une boule de mercure. Si le niveau du liquide à l'intérieur du réservoir monte au-dessus du contact, la capsule s'incline, ce qui établit (ou rompt) un circuit

électrique. La conception même des contacts de niveau à basculement fait qu'ils réagissent à de très faibles changements de niveau. Les circuits de régulation doivent donc comprendre au moins deux contacts de ce genre.

Les contacts à basculement plus lourds que le liquide dont ils mesurent le niveau peuvent être simplement suspendus au bout du fil électrique à la hauteur voulue. Les contacts plus légers doivent être fixés à la position voulue.

2.7 *Contacts à flotteur* Deux bagues fixées à une tige à laquelle est aussi fixé un flotteur forment le modèle le plus courant de contact à flotteur. À mesure que le niveau de liquide monte, la tige monte. Lorsque la bague du bas atteint le mécanisme du contact, la tige change l'état du contact. Lorsque le niveau du liquide descend assez pour que la bague du haut de la tige atteigne le contact, le contact reprend son état original.

D'autres types de contacts à flotteur sont munis d'un système de poulies et de contre-poids agissant sur un axe rotatif muni d'un contact à mercure. Les contacts de ce genre conviennent aux applications pour lesquelles il faut plusieurs points de contact ainsi que des différentiels réglables.

2.8 *Contacts à conductivité* Les contacts à conductivité sont formés de deux sondes exposées, habituellement à des hauteurs différentes, au contact du liquide. Quand le liquide touche les deux sondes, le contact change d'état. Le différentiel de fonctionnement est possible, avec la plupart des contacts à conductivité, par l'utilisation de sondes multiples. Une deuxième sonde dans un réservoir peut, par exemple, faire passer la vitesse de basse à élevée d'une pompe à deux vitesses afin d'augmenter le débit de chargement du réservoir.

On ne devrait pas utiliser des contacts à conductivité dans des procédés où des matières non conductives, comme de la graisse ou de l'huile, peuvent s'accumuler sur les sondes.

2.9 *Contacts à ultrasons* Les contacts à ultrasons déterminent le niveau du liquide grâce à un retard. Le temps qu'il faut à une impulsion d'ultrasons pour quitter le transducteur, frapper le liquide et retourner au transducteur est fonction du niveau du liquide. La plupart des contacts à ultrasons peuvent avoir plusieurs points de fonctionnement et certains sont dotés d'une logique complète de commande de pompe (avec exploitation de plusieurs pompes) intégrée aux commandes électroniques.

Les contacts à ultrasons peuvent être utilisés dans les applications difficiles de régulation de niveau ou dans des endroits dangereux; il peut s'agir, par exemple, de la mesure du niveau d'eaux usées, de liquides visqueux ou de boue.

La poussière nuit au bon fonctionnement de certains contacts à ultrasons pour la mesure du niveau des solides. Mieux vaut consulter le fabricant avant de choisir un appareil à ultrasons pour les endroits sujets à la poussière.

2.10 *Contacts à diaphragme* Le contact à diaphragme s'installe sur la paroi d'un silo et capte la pression des solides contre le diaphragme. Le déplacement du diaphragme actionne un contact situé à l'extérieur du silo.

2.11 *Contacts de couple* Un contact de couple consiste en une roue à palettes entraînée par un moteur, le tout étant monté sur la paroi d'un silo. Lorsque les solides entourent la roue à palettes, cette dernière cesse de tourner, ce qui a pour effet d'actionner un interrupteur de couple monté à l'extérieur du silo. Le différentiel de fonctionnement peut être obtenu en utilisant plusieurs contacts de couple. Ils peuvent alors servir à augmenter ou diminuer les débits d'entrée ou de sortie plutôt que de permettre ou d'interdire le passage du produit.

## 2.12 Contacts thermiques

Les contacts thermiques réagissent à la température d'un point donné d'un système. Ils actionnent en outre un contact en vue de conserver la température à une consigne, ou à une série de consignes, dans des limites déterminées.

Les points de fonctionnement des contacts thermiques doivent être indiqués sur les schémas logiques de la même manière que ceux des contacts de niveau ou de pression.

2.13 *Contacts à bilame* Les contacts à bilame sont formés par l'assemblage collé de deux lames, chacune d'un métal différent et ayant un coefficient de température distinct. Le changement de température provoque la courbure du bilame qui exerce alors un effort sur le mécanisme du contact.

Ces contacts ne coûtent pas cher et on les trouve souvent dans les installations de chauffage et de ventilation.

2.14 *Contacts à tube capillaire* Dans les contacts de ce genre, un liquide placé dans un compartiment étanche, le bulbe, se dilate sous l'effet de la hausse de la température. La dilatation du liquide pousse un piston qui agit sur le mécanisme du contact.

En règle générale, le tube capillaire et le contact se trouvent dans le même coffret. Par contre, il arrive que le contact se trouve dans un coffret tandis que le bulbe se retrouve à l'extrémité d'un tube capillaire assez long pour être installé à distance. Les capteurs à tube

capillaire peuvent capter la température en un seul point, ou ils peuvent faire la moyenne des températures auxquelles le tube capillaire est soumis sur toute sa longueur. Ce dernier type de tube est particulièrement adapté aux applications où la température peut ne pas être uniforme, dans des conduits de circulation d'air, par exemple.

Les contacts à tube capillaire sont offerts avec un différentiel fixe ou réglable.

## 2.15 Relais

Les relais sont le plus souvent utilisés dans les systèmes de régulation électromécaniques auxquels ils donnent la possibilité de prise de décisions en formant des réseaux de circuit logique. En outre, les relais remplacent les contacts quand il s'agit de commander l'alimentation d'appareils placés à distance ou de commander des organes sous forte tension ou fort courant avec des contacts n'acceptant que de faibles tensions ou faibles courants.

On peut se procurer des relais dotés de bobine acceptant diverses tensions et de contacts laissant passer des courants de diverses intensités. Certains relais possèdent jusqu'à huit contacts qui peuvent être ouverts ou fermés au repos; les contacts peuvent même être agencés de façon à offrir diverses combinaisons de positions de repos. Il existe aussi des relais de qualité industrielle dont les contacts peuvent être convertis selon les besoins de l'installation. Cette possibilité est attrayante si le système peut avoir besoin de modifications après l'installation.

Il peut être bon de prévoir des relais montés sur support si l'on prévoit devoir les remplacer souvent du fait qu'ils fonctionnent souvent, par exemple. Ce genre de relais peut aussi être un facteur à considérer si le prix de l'appareil doit jouer un rôle important à la conception.

Certains relais de commande de qualité industrielle sont offerts avec des contacts sous enveloppe hermétique. Ce sont des commutateurs à lame et leurs contacts ne peuvent servir que pour des tensions ou des courants très faibles. Ils sont utiles dans les lieux dangereux.

2.16 *Relais à verrouillage* Les relais à verrouillage sont utilisés si l'on désire que le relais conserve son état pendant une panne de courant ou après une commande momentanée. Un relais à verrouillage peut, par exemple, fonctionner de concert avec un pressostat à maximum de pression de refoulement installé sur une pompe. Le pressostat arrête la pompe en alimentant momentanément le relais de verrouillage qui, lui, coupe le courant passant dans la bobine du démarreur de la pompe. Une fois le moteur arrêté, la pression de refoulement de la pompe chute, mais le relais à verrouillage empêche le moteur de redémarrer tant que l'opérateur ne réenclenche pas le relais à verrouillage.

Le verrouillage de ce genre de relais est soit magnétique, soit mécanique. La plupart ont deux bobines, l'une pour verrouiller les contacts, l'autre pour les déverrouiller. Il est possible de transformer des relais de qualité industrielle en relais à verrouillage en leur installant un accessoire de verrouillage.

2.17 *Relais de temporisation* Les relais de temporisation fonctionnent en «retard à l'amorçage» et «en retard au désamorçage». Dans le cas du retard à l'amorçage, les contacts du relais changent d'état après un retard déterminé après la mise sous tension. Les contacts des relais à «retard à l'amorçage» sont identifiés comme «ouverts au repos fermant à retard» (NOTC) et comme «fermés au repos ouvrant à retard» (NCTO).

Les contacts des relais à «retard au désamorçage» changent d'état après un retard déterminé après la coupure de la tension. Les contacts des relais à «retard au désamorçage» sont identifiés comme «ouverts au repos ouvrant à retard» (NOTO) ou comme «fermés au repos fermant à retard» (NCTC).

La fonction de temporisation d'un relais de temporisation mécanique est habituellement réglée par le débit d'un fluide s'écoulant depuis un soufflet comprimé par un ressort par l'ouverture d'un robinet à pointeau réglable. D'autres relais sont dotés d'un circuit électronique assurant cette fonction de temporisation.

Il est possible de transformer des relais de qualité industrielle en relais de temporisation en leur installant un accessoire approprié.

2.18 *Séquenceurs* Les séquenceurs, ou sélecteurs pas à pas, servent dans les systèmes de régulation quand une série d'actions doivent avoir lieu dans un ordre donné, l'une après l'autre. Un exemple de ce genre de système est une installation de démarrage automatique d'un groupe de gros moteurs. Le fort appel de courant des gros moteurs fait qu'il est impossible de les lancer tous en même temps. Un sélecteur pas à pas commandé par un relais de temporisation lance les moteurs tour à tour en introduisant un retard entre les pas du sélecteur.

Certains séquenceurs sont bi-directionnels, c'est-à-dire qu'ils ont deux bobines, l'une pour passer d'un pas à l'autre dans un sens donné, l'autre pour passer d'un pas à l'autre dans l'autre sens.

## 2.19 Commandes électromécaniques

Les systèmes de régulation électromécaniques sont composés de capteurs, de sélecteurs, de relais, de relais de temporisation et de séquenceurs raccordés entre eux selon un schéma logique. Selon l'agencement sur le schéma et les signaux d'entrée, les commandes électromécaniques actionnent des organes terminaux comme des moteurs, des robinets et des vannes. Les signaux numériques constituent généralement les entrées et les sorties des systèmes de régulation électromécaniques modernes.

## 2.20 Dispositifs de régulation analogique

Une régulation continue ou soutenue est mieux assurée par le dispositif de régulation analogique ou modulant. Il existe deux catégories fondamentales de systèmes de régulation analogique : électronique et électromécanique.

2.21 *Dispositifs électromécaniques de régulation analogique* Les dispositifs électromécaniques de régulation analogique assurent le plus couramment la régulation de la pression, de la température et de l'humidité dans les installations de chauffage et de ventilation commerciales. Cependant, ils conviennent aussi à d'autres applications exigeant une simple régulation. On peut facilement se procurer ces dispositifs de régulation, ils ne coûtent pas cher et leur entretien est facile.

Le dispositif de régulation consiste en un potentiomètre qui réagit aux changements de l'objet à mesurer. Les changements qui surviennent dans le procédé (ex. la hausse de la température) cause un changement de la pression du fluide qui se trouve dans un bulbe et un tube capillaire. Des soufflets transmettent ce changement à un agencement de leviers qui déplace le contact glissant du potentiomètre.

Le dispositif commandé est habituellement un train d'engrenages qui est entraîné par un moteur et dont l'arbre de sortie peut tourner sur 160°. Cet arbre est relié à des obturateurs, des vannes ou des registres soit directement, soit, le plus souvent, par l'intermédiaire d'une série de tringles. Le moteur est inversible et le circuit comprend un relais différentiel et un potentiomètre de réaction. Un jeu de contacts du relais différentiel lance le moteur, l'arrête ou en inverse le sens de rotation. Le relais différentiel fait fonctionner le moteur jusqu'à ce que le signal produit par le potentiomètre du dispositif de régulation égale celui du potentiomètre de réaction interne.

Des potentiomètres de commande manuelle insérés dans le circuit du signal de sortie permettent de commander le moteur directement. Ils limitent aussi la course du moteur. Un dispositif de régulation peut commander plusieurs moteurs par l'intermédiaire d'un potentiomètre auxiliaire placé sur l'un des moteurs.

2.22 *Dispositifs électroniques de régulation analogique* Les dispositifs électroniques de régulation analogique diffèrent de leurs pendants électromécaniques en deux points. Les dispositifs électroniques de régulation ont des possibilités de régulation plus évoluées et font appel à des signaux de commande différents. Les dispositifs électroniques de régulation convertissent en premier lieu les variables du procédé (ex. la température) en un signal électronique que le dispositif électronique de régulation utilise ensuite pour prendre des décisions.

Le signal standard de l'appareil électronique de régulation est un courant de 4 à 20 mA, 4 mA représentant la plus basse valeur de la variable du procédé et 20 mA la plus élevée. Si plusieurs instruments utilisent le même signal de procédé comme signal d'entrée, le courant de 4 à 20 mA est acheminé vers une résistance de précision de 250 ohms afin de convertir le signal en une tension de 1 à 5 volts. Ce second signal est un autre standard de l'industrie qui sert pour les panneaux de commande où la faible longueur des fils n'est pas un obstacle pour les signaux.

Le signal de sortie du dispositif de régulation est aussi un courant de 4 à 20 mA. Ce signal fait fonctionner l'organe terminal sur toute sa gamme de fonctionnement. Certains organes terminaux, comme les moteurs à vitesse variable ou les vannes motorisées, acceptent directement le signal de 4 à 20 mA. D'autres ont besoin d'un dispositif intermédiaire qui convertit le signal en d'autres variables. Un conditionneur courant—pression (I/P), par exemple, peut transformer ce signal (de 4 à 20 mA) en pression pneumatique de 20 à 120 kPa pour faire fonctionner une vanne à commande pneumatique. D'autres dispositifs intermédiaires convertissent le signal de 4 à 20 mA en tension, en pression hydraulique, en fréquence ou en courant.

Contrairement aux dispositifs de régulation électromécaniques, les systèmes électroniques de régulation doivent faire l'objet de mesures particulières en ce qui a trait au câblage et à l'installation. Les lignes directrices suivantes peuvent aider à diminuer l'influence des parasites électriques sur le fonctionnement optimal des appareils électroniques. Cependant, si le système comporte plus qu'une ou deux fonctions de régulation analogique, mieux vaut consulter des ouvrages portant sur les instruments industriels afin d'obtenir de plus amples renseignements.

- Il faut s'assurer que tout le câblage est conforme aux exigences du *Code canadien de l'électricité* ou aux meilleures pratiques commerciales précisées par les codes locaux régissant les installations électriques.
- Pour les câbles qui transportent des signaux analogiques, il faut utiliser des paires torsadées à blindage intégral de feuille de cuivre ou à blindage de Mylar recouvert d'une couche conductrice dotée d'un fil de masse.
- Il faut tenir les câbles qui transportent des signaux à au moins 200 mm des câbles d'alimentation secteur et de commande à courant alternatif.
- Le croisement de faisceaux de câbles qui transportent des signaux avec des câbles qui transportent du courant alternatif doit se faire à angle droit.
- Mettre les fils blindés à la terre à une extrémité seulement, de préférence à la salle de commande.

## 2.23 Processeurs programmables

Un processeur programmable est un système de régulation qui peut être réglé (programmé) de façon à fonctionner d'une certaine manière. Il utilise les mathématiques (la logique) afin d'établir des relations entre les conditions ou les événements et de produire une sortie prescrite et modifiable.

Maintenant offerts dans une vaste gamme de grosseurs, les processeurs programmables peuvent remplacer les installations électromécaniques classiques dans tous les systèmes de régulation, jusqu'aux plus petits. La plupart des processeurs programmables sont programmés selon la logique en échelle ordinaire et remplacent directement les appareils classiques. Tous les processeurs programmables ont en standard des relais, des relais à verrouillage, des relais de temporisation, des compteurs et des séquenceurs. Plusieurs processeurs programmables offrent en outre des fonctions étendues de régulation analogique ainsi que des fonctions mathématiques. Des systèmes de régulation entiers fonctionnent avec ces appareils fiables.

Certains processeurs programmables peuvent aussi communiquer avec des systèmes informatiques éloignés ou, même, avec d'autres processeurs programmables. Les gros systèmes de régulation, comme les élévateurs à grains, peuvent profiter de cette capacité en ajoutant au système global l'information aux fins de comptabilité et de gestion.

Les processeurs programmables sont conçus de façon à résister aux mauvais traitements, à fonctionner à des températures ambiantes de 0 à 60 °C et au milieu de forts parasites électriques. Cependant, certaines machines perdent leur fiabilité lorsque l'alimentation électrique subit des périodes de basse tension soutenue ou transmet des harmoniques. Ce sont là des phénomènes courants en milieu rural, particulièrement dans les endroits où il y a des convertisseurs de phase ou de gros moteurs en marche. Il faut s'assurer que les processeurs programmables appelés à fonctionner dans de tels milieux ont fait leurs preuves.

Les processeurs programmables sont composés de cinq éléments d'importance :

- unité centrale
- mémoire
- circuits d'entrée
- circuits de sortie
- programmeur.

2.24 *Unité centrale* L'unité centrale agit comme le «cerveau» du dispositif de régulation. C'est ici que le processeur programmable interprète et exécute le programme.

En exécutant le programme, le processeur examine toutes les entrées du système pour en déterminer l'état. Il vérifie si les entrées numériques ont un niveau haut ou un niveau bas. Dans le cas des entrées analogiques, l'unité centrale détermine la valeur de la variable du procédé ou des variables. Il commande ensuite les circuits de sortie selon la logique du programme.

Le programme se répète, depuis le haut du schéma en échelle jusqu'au bas, tant que le processeur programmable est en marche. La fréquence à laquelle le programme se répète s'appelle durée d'exploration. La durée de l'exploration peut être de 1 à 200 ms, selon le type de processeur programmable et la longueur du programme. Pour les applications qui exigent une réaction rapide à des événements extérieurs, des appareils d'emballage de matériel, par exemple, la durée de l'exploration est critique. Cependant, dans la plupart des systèmes de régulation, la durée d'exploration de 200 ms ne pose pas de difficulté.

2.25 *Mémoire* Le processeur programmable peut contenir des programmes de diverses longueurs selon la mémoire que possède le dispositif de régulation. La mémoire se mesure en K, chaque K représentant 1024 mots contenus en mémoire. Certains processeurs programmables utilisent des mots contenant plus d'information que d'autres. Par conséquent, une machine de 8 K d'un genre peut ne pas stocker plus de programmes qu'une autre dite de 4 K. De même, certains types de processeurs programmables utilisent la mémoire plus

efficacement, souvent selon le rapport calculs-logique du programme. Il faut aussi noter qu'un processeur programmable de 32 K est considéré comme très gros, alors qu'un ordinateur personnel de même mémoire est considéré comme petit.

Dans la plupart des processeurs programmables, l'extension de la mémoire coûte cher quand elle n'est tout simplement pas possible au-delà d'un certain point. Tous les constructeurs offrent des processeurs programmables de diverses puissances. Il faut donc avoir soin de choisir celui dont la mémoire permet de combler les besoins du système de régulation.

2.26 *Circuits d'entrée* Les circuits d'entrée sont regroupés en unités, les modules, qui acceptent de 4 à 32 circuits d'entrée chacune. Les modules d'entrée sont généralement enfichés dans des baies qui sont elles-mêmes reliées à l'unité centrale. Les processeurs programmables acceptent les signaux d'entrée aussi bien numériques qu'analogiques.

Le processeur accepte des signaux d'entrée analogique de diverses tensions tant en courant alternatif (ca) qu'en courant continu (cc) et les circuits d'entrée peuvent être isolés ou non. Les circuits d'entrée isolés relient le dispositif de régulation à des sources de tension individuelles, comme des démarreurs de moteurs électriques. Les circuits non isolés utilisent une source commune de tension pour plusieurs signaux.

Plusieurs circuits d'entrée analogiques fournissent de l'information au dispositif de régulation. Ces signaux comprennent des tensions ( 1 à 5 volts), des courants (4 à 20 mA) et des données obtenues directement de thermocouples pour la mesure de la température.

2.27 *Circuits de sortie* Les circuits de sortie sont disposés en modules de la même manière que les circuits d'entrée. Et, tout comme les circuits d'entrée, les circuits de sortie peuvent être isolés ou non.

Seuls les semi-conducteurs ou les contacts des relais peuvent produire des signaux de sortie du processeur programmable. Les signaux de sortie de 5 à 230 volts (ca ou cc) sont possibles. Les circuits de sortie analogique sont habituellement construits de façon à produire un signal courant de 4 à 20 mA.

2.28 *Programmeur* Le programmeur est un appareil portatif servant à entrer le programme dans le processeur programmable. Les programmeurs des gros processeurs programmables comprennent un clavier d'ordinateur ainsi que des écrans de visualisation pleine grandeur. Pour les petits processeurs programmables, on utilise des petits claviers du genre calculette dont l'affichage est à cristaux liquides.

La plupart des constructeurs de processeurs programmables offrent maintenant des logiciels qui permettent d'utiliser tout ordinateur personnel comme programmeur. Cette possibilité devient de plus en plus populaire à mesure que l'ordinateur personnel se répand et que son prix baisse. De plus, l'ordinateur personnel peut servir à d'autres fins qu'à la programmation des processeurs programmables tandis que le programmeur spécialisé n'a aucune autre utilité.

## 2.29 Logiciel

Bien que tous les processeurs programmables tentent de faire concurrence aux dispositifs électromécaniques de régulation, des systèmes différents, même chez un même constructeur, remplissent cette fonction de diverses manières. L'utilisation des relais à verrouillage illustre bien la manière dont les processeurs programmables diffèrent. Un fabricant utilise une seule bobine tandis qu'un autre en utilise deux (verrouillage et réenclenchement). Après une panne de secteur, le relais à verrouillage à deux bobines fonctionne exactement de la même manière que son pendant électromécanique; le relais à une seule bobine reste verrouillé seulement pendant la première exploration du dispositif de régulation qui suit le retour du secteur.

La manière dont la logique est résolue est un autre exemple des différences entre les processeurs programmables. Certains systèmes divisent le schéma de l'échelle en réseaux puis résout la logique réseau par réseau, depuis le début du programme jusqu'à la fin. D'autres processeurs programmables disposent la logique en une série continue d'étapes sans la diviser en réseaux. Différents dispositifs de régulation accomplissent les fonctions mathématiques de manières différentes.

La personne qui conçoit des logiciels pour les processeurs programmables doit comprendre ces différences. Il faut faire l'essai de chaque fonction de commande sur un circuit de démonstration afin de déterminer si l'appareil fonctionne tel que prévu.

## 2.30 Documentation

Les processeurs programmables conservent en mémoire un enregistrement du programme logique ainsi que des modifications qui lui ont été apportées. Cette information peut, à tout moment, être reproduite sur une imprimante.

L'imprimé habituel de la logique a été amélioré de façon à maintenant donner la liste annotée du programme. La liste imprimée

donne les détails de la logique du programme ainsi que la description en clair de ce que fait la logique. On y retrouve aussi la liste des endroits du programme où la logique est soumise à des actions extérieures.

## 3 MESURE DES VARIABLES DU PROCÉDÉ

Le choix du matériel de mesure approprié dépend de trois facteurs importants qu'il convient de définir clairement :

- l'objectif de la mesure
- la plage de mesure prévue
- les qualités physiques normales et anormales de la substance à mesurer, y compris la pression, la température, la corrosivité, les constituants qui peuvent entraver la mesure et les aspects dangereux.

Ces trois mêmes facteurs aident à déterminer la précision, la sensibilité, la fidélité et la fiabilité qu'exige l'application.

Il faut choisir les dispositifs de mesure seulement après avoir défini l'application. Puis, quand on choisit l'appareil, il faut bien comprendre les principes fondamentaux de fonctionnement des dispositifs offerts pour cette application.

Presque toutes les variables de procédé peuvent être mesurées et converties en un signal de 4 à 20 mA. On utilise ensuite ce signal analogique afin de déterminer, par exemple, les points de commutation pour la commande des moteurs, des obturateurs, des vannes et des circuits d'alarme.

Les systèmes de régulation classiques assurent la mesure des variables d'un procédé à l'aide d'un commutateur analogique agissant sur des jeux de contacts à des consignes prédéterminées. Bien programmés, les processeurs programmables acceptent des signaux analogiques et actionnent des organes de sortie en se basant sur la valeur analogique. Par exemple, la sortie d'un capteur de température peut être branchée soit à des commutateurs analogiques, soit aux modules d'entrée analogique d'un processeur programmable.

Les fournisseurs d'instruments offrent une vaste gamme de dispositifs de mesure des variables de procédé. La plupart des fournisseurs offrent aussi des catalogues complets pouvant faciliter le choix du matériel.

### 3.1 Dispositifs de mesure du niveau

Il faut choisir entre les dispositifs de mesure du niveau avec ou sans contact avec le produit dont on mesure le niveau. Les instruments à contact comprennent les systèmes à flotteur mécanique, les sondes de capacitance, les transmetteurs de pression et les capteurs de déplacement. Les transmetteurs à ultrasons, les systèmes à barboteur et les transmetteurs de poids assurent une mesure sans contact avec la matière dont on mesure le niveau.

Les appareils à ultrasons permettent de mesurer le niveau de matières solides si la grosseur des grains est uniforme et leur humidité constante.

La mesure du niveau pose des problèmes dont les plus courants sont la turbulence de surface, la viscosité du liquide et la présence de poussières, ce dernier étant particulier à la mesure par ultrasons.

### 3.2 Débitmètres

Il y a huit types courants de débitmètres :

- à mesure de pression
- électromagnétiques
- à mesure de vitesse
- volumétriques
- à ultrasons
- à vortex
- à mesure de force – déplacement
- massiques.

Il est possible d'obtenir une mesure du débit précise en veillant à une bonne conception des conduites situées en aval et en amont des débitmètres. Il faut donc suivre les recommandations des fabricants.

3.3 *Débitmètres à mesure de pression* Les débitmètres de ce genre mesurent l'écart de pression qu'il y a entre les deux côtés d'une restriction placée dans le passage du fluide; cette mesure obéit à l'équation générale :

$$Q_v = KA\sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

où $Q_v$ = débit volumique ($m^3/s$)

$A$ = surface de section transversale de l'écoulement dans la restriction ($m^2$)

$K$ = constante d'étalonnage du débitmètre

$\Delta p$ = différence de pression en travers de la restriction (Pa)

$\rho$ = densité du fluide (kg/m$^3$)

Un transmetteur de pression différentielle convertit en un signal électronique la pression différentielle entrée-sortie. Le signal n'est habituellement pas linéaire et il faut donc utiliser un détecteur de valeur efficace pour obtenir un signal linéaire au besoin.

Un débitmètre ordinaire à mesure de pression a une marge de réglage effective de 3:1. Par exemple, un débitmètre conçu pour mesurer un débit de 30 L/s peut prendre une mesure fiable d'un débit minimal de 10 L/s. La précision est habituellement de 1,5 à 2 % de la gamme.

Quelques-uns des débitmètres les plus courants sont les débitmètres Venturi, à tube de Dall, à diaphragme, à tuyères et à tube de Pitot. On les utilise pour les gaz et les liquides propres.

3.4 *Débitmètres électromagnétiques* Les débitmètres électromagnétiques mesurent le débit volumique des liquides conducteurs d'électricité qui traversent un champ magnétique à l'intérieur d'un tube. Étant donné leur coût relativement élevé, ces débitmètres ne sont utilisés que si l'on a besoin d'une vaste plage de mesures ou d'une haute précision, ou si l'on doit mesurer le débit de liquides visqueux, corrosifs ou malpropres.

La marge de réglage effective d'un débitmètre électromagnétique est de 20:1 et sa précision est de 1 % de la gamme. Le signal de sortie est linéaire.

3.5 *Débitmètres à mesure de vitesse* Les débitmètres à mesure de vitesse mesurent le débit d'un fluide au moyen d'une turbine ou d'une hélice. Le signal de sortie prend la forme d'une série d'impulsions dont la fréquence augmente avec le débit. Un conditionneur fréquence-courant intégré au débitmètre produit un signal analogique de 4 à 20 mA. Le signal analogique est linéaire.

Les débitmètres à turbine et à hélice ont tous deux une marge de réglage effective de 15:1. Les débitmètres à turbine ont une précision de 0,5 % de la gamme, tandis que ceux à hélice en ont une de 1 % de la gamme.

Les débitmètres à turbine ne doivent pas être utilisés dans les liquides contenant des solides ou s'il est possible qu'il y ait introduction d'air entraîné dans l'écoulement du liquide.

3.6 *Débitmètres volumétriques* Les débitmètres volumétriques divisent le fluide qui s'écoule en parties qu'ils comptent comme représentatifs du débit total. Quelques débitmètres courants fonctionnent sur les principes suivants :

- disque oscillant
- rotors ou roues d'engrenage
- palettes coulissantes
- palettes
- piston alternatif
- piston oscillant
- diaphragme.

Tout comme les débitmètres à mesure de vitesse, les débitmètres volumétriques produisent un signal de sortie sous forme d'une série d'impulsions. Un conditionneur fréquence—courant convertit les pulsions en des signaux analogiques de 4 à 20 mA qui sont un courant linéaire.

Les débitmètres volumétriques ont habituellement une marge de réglage effective de 10:1 et une précision de 1 % de la gamme.

On doit les utiliser pour des fluides propres seulement.

3.7 *Débitmètres à ultrasons* Les débitmètres à ultrasons fonctionnent à l'aide d'impulsions qui se propagent dans le liquide en mouvement. L'appareil dérive le débit selon l'écart entre la période des ondes transmises en amont et celle des ondes transmises en aval. Les débitmètres à ultrasons produisent un signal de sortie linéaire.

La marge de réglage effective des débitmètres à ultrasons est de 20:1 et leur précision de 1 % de la gamme.

Les débitmètres à ultrasons conviennent pour une vaste gamme d'applications dont la mesure dans les grosses conduites, la mesure du débit de fluides malpropres, corrosifs et visqueux. Certains de ces appareils peuvent être facilement ajoutés à des canalisations existantes. Cependant, des utilisateurs ont, semble-t-il, utilisé ces appareils avec plus ou moins de bonheur. Le choix et l'utilisation des débitmètres à ultrasons doivent faire l'objet de soins appropriés.

3.8 *Débitmètres à vortex* Les débitmètres à vortex mesurent le débit en mesurant la vitesse selon le principe de la précession du vortex. Un élément de l'installation provoque la formation d'un vortex dans lequel le fluide tourbillonne très rapidement. Lorsque le vortex débouche dans une section plus grande, il suit un passage hélicoïdal sur le corps de l'appareil. Le débit est déterminé en mesurant la fréquence de la précession hélicoïdale.

Les débitmètres à vortex peuvent avoir une marge de réglage effective jusqu'à 100:1 et une précision de 1 % de la gamme. Le signal sortie est linéaire.

Le débitmètre à vortex s'utilise pour des fluides propres.

3.9 *Débitmètres à mesure de force-déplacement* Les débitmètres à mesure de force-déplacement réagissent à la force exercée par le fluide en mouvement contre un obstacle placé sur le passage du fluide. Cette force provoque la déflexion de l'élément primaire. La déflexion varie avec la pression différentielle et indique le débit.

Ces appareils ont une marge de réglage effective de 5:1 et une précision se situant entre 1 et 5 % de la gamme. Le débitmètre à mesure de déplacement sert à mesurer le débit des fluides autant que celui des solides.

3.10 *Débitmètres massiques* Les débitmètres massiques, utilisés pour mesurer le débit de matières granulaires, sont offerts en deux types :

- courroie à pesée
- trémie à pesée et déchargement.

La courroie à pesée typique consiste en un court transporteur à courroie monté sur des capsules extensométriques. Le débitmètre à courroie mesure la vitesse de la courroie et pèse la courroie puis calcule le débit massique instantané. Certains débitmètres à courroie produisent un signal de sortie linéaire de 4 à 20 mA. Les débitmètres de ce genre peuvent avoir une précision de 1 %.

La trémie de pesée et déchargement fonctionne en répétant les opérations qui consistent à remplir un contenant, à en peser ensuite le contenu puis à le décharger. Le nombre de répétitions de l'opération et le poids du contenu de chaque contenant vidé fournissent la mesure du débit. Le débitmètre à pesée et déchargement permet de mesurer de forts volumes avec une précision de 0,1 %.

## 3.11 Transmetteurs de pression

Les types les plus courants de transmetteurs de pression sont à manomètre et différentiel. Ces transmetteurs déterminent la pression en mesurant la déflexion d'un diaphragme, d'un soufflet ou d'un tube de bourdon. Divers types de dispositifs permettent de mesurer la déflexion dont les jauges extensométriques, les capteurs à capacitance ou à induction variable, les capteurs piézoélectriques, les transformateurs différentiels et les dispositifs à potentiomètre.

Les instruments industriels mesurent habituellement la déflexion par des jauges extensométriques. Les applications commerciales font plus couramment appel aux dispositifs à potentiomètre. Dans tous les cas, cependant, un circuit électronique convertit le signal de l'élément primaire en un courant de 4 à 20 mA. Il arrive souvent que le transmetteur contienne le circuit de conversion de façon qu'il n'y ait que deux fils à installer dans le circuit.

Les transmetteurs de pression mesure principalement des niveaux. Cependant, s'ils sont utilisés avec un élément primaire à pression, ils mesurent aussi le débit. Dans les deux cas, il faut choisir un transmetteur différentiel, qui peut aussi mesurer les pressions négatives.

Si l'on utilise un tube de Bourdon dans une installation dont la pression varie rapidement ou dans des endroits où il y a beaucoup de vibrations, il faut ajouter un amortisseur à l'huile pour éviter d'endommager le tube de bourdon.

## 3.12 Capteurs de température

Les capteurs de température varient selon le principe de fonctionnement fondamental des éléments capteurs. On choisit le transmetteur de température selon la gamme de température à mesurer, le coût et le nombre de points de mesure. Les capteurs de température les plus courants sont les suivants :

- capteurs thermoélectriques
- capteurs thermorésistifs
- capteurs à tube plein
- capteurs à circuit intégré.

3.13 *Capteurs thermoélectriques* Les capteurs thermoélectriques—ou thermocouples—sont formés d'une paire de fils de métaux différents joints à leur extrémité. Si deux jonctions sont à des températures différentes, il se produit une tension. Une des jonctions, la jonction de référence, est conservée à une température connue et constante en sorte que la tension produite est directement proportionnelle à la température de la deuxième jonction, la jonction de mesure. Les combinaisons de fils des thermocouples varient selon leur application.

Cependant, la très faible tension produite par les thermocouples limite leur utilisation. Les courants parasites induits dans le circuit ont un effet dévastateur sur le courant mesuré. Pour corriger cette situation, il faut, pour raccorder le capteur à l'appareil de sortie, utiliser des fils et des bornes faits du même matériau de base que le thermocouple.

En général, le thermocouple coûte moins cher que la plupart des autres capteurs de température et il convient à plus de situations qu'eux. Il faut choisir le matériau de thermocouple correspondant à la gamme de températures prévue, afin que le signal de sortie du thermocouple soit linéaire. Les

catalogues que l'on peut se procurer chez les fournisseurs offrent un grand choix de thermocouples.

3.14 *Capteurs thermorésistifs* Les capteurs thermorésistifs—ou capteurs de température à résistance—fonctionnent selon le principe que la résistance d'un fil de métal change avec la température. Bien que tous les métaux aient cette propriété, seul le cuivre, le nickel et le platine ont une résistance acceptable pour la construction des capteurs de température à résistance.

À l'encontre des thermocouples, les capteurs de température à résistance conservent leur température quelle que soit la distance qui sépare l'endroit où se fait la mesure de l'endroit où le capteur est raccordé à l'appareil de sortie. En outre, les variations de température sur cette distance ont peu d'effet sur la précision des capteurs de température à résistance, particulièrement s'ils sont faits de quatre fils.

3.15 *Capteurs à tube plein* La dilatation thermique d'un fluide contenu dans un tube fermé hermétiquement actionne certains transmetteurs de température. Une jauge extensométrique ou un potentiomètre mesure la déflexion d'un diaphragme ou le déplacement d'un piston un peu comme le fait un transmetteur de pression.

Les capteurs à tube plein possèdent souvent un circuit électronique qui donne un signal de sortie de 4 à 20 mA. Ce signal est linéaire.

Les capteurs à tube plein permettent particulièrement de mesurer la température moyenne d'un lieu. Ces systèmes mesurent la température par l'intermédiaire d'un tube capillaire qui a été conçu de façon à être sensible à la température sur une bonne longueur.

Les transmetteurs de température à dilatation thermique coûtent relativement cher. Cependant, leur installation ne pose pas d'exigences compliquées, ce qui compense leur coût élevé, particulièrement dans les systèmes de régulation exigeant peu de mesures de température.

3.16 *Capteurs à circuit intégré* Le capteur à circuit intégré est relativement nouveau dans la panoplie des capteurs de température. Son prix est bas et il produit un signal de sortie linéaire et stable pour des températures de −100 °C à +150 °C.

## 3.17 Mesure de la puissance

L'information tirée de la mesure de la puissance fournit diverses données concernant le fonctionnement des systèmes de régulation. Utilisée directement, la mesure de puissance permet au système de régulation de protéger des moteurs ou de limiter la puissance de pointe sur laquelle le fournisseur d'électricité calculera sa facture. La mesure de la puissance peut servir indirectement d'indicateur de fonctionnement d'appareils mécaniques. Dans les systèmes comprenant de gros moteurs, la mesure de la puissance utilisée de concert avec le processeur programmable permet de réduire les problèmes de facteur de puissance ainsi que la facture qui les accompagne.

Deux éléments primaires se retrouvent dans les appareils de mesure de la puissance :

- transformateur d'intensité
- transformateur de potentiel, ou potentiomètre.

Les transformateurs d'intensité sont des dispositifs en forme d'anneau. Les fils dans lesquels circule le courant de la charge passent par le centre de l'anneau du transformateur de courant. Le transformateur d'intensité produit un signal de sortie qui se situe habituellement entre 0 et 5 A pour la gamme de courant de fonctionnement de la charge.

Les transformateurs de potentiel sont raccordés entre les fils du circuit d'alimentation de la charge et produisent un signal proportionnel à la tension d'entrée.

Divers organes acceptent les signaux de sortie des transformateurs d'intensité et de potentiel, et ils produisent en retour un signal de sortie de 4 à 20 mA qui représentent des valeurs comme le courant consommé par le moteur, le facteur de puissance, le déséquilibre de phase et la puissance en kilowatts. Le signal de 4 à 20 mA peut servir de signal d'entrée des commutateurs analogiques classiques ou des processeurs programmables. Ces signaux peuvent aussi alimenter directement des compteurs.

## 3.18 Capteurs de rotation

Deux organes mesurent habituellement la vitesse de rotation d'un arbre :

- dynamo tachymètre
- capteur optique ou magnétique.

La dynamo tachymètre produit un courant alternatif dont la fréquence est proportionnelle à la vitesse de rotation. Les capteurs optiques ou magnétiques produisent des séries d'impulsions dont la fréquence est liée à la vitesse de rotation de l'arbre.

La plupart du temps, des conditionneurs de signal convertissent les signaux des capteurs de rotation en courant de 4 à 20 mA. Certains processeurs programmables acceptent cependant l'entrée directe des signaux à fréquence.

### 3.19 Capteurs de position

Des potentiomètres entraînés par des roues d'engrenage, ou des codeurs d'arbre, déterminent habituellement la position de certains appareils comme les vannes, les obturateurs ou les distributeurs.

Les capteurs à potentiomètre sont les plus simples et les moins chers. Cependant, les potentiomètres doivent être couplés à des conditionneurs résistance-courant pour convertir le signal de position en signal de courant de 4 à 20 mA.

Les codeurs d'arbre sont plus précis que les potentiomètres, mais ils coûtent beaucoup plus cher. Les codeurs optiques produisent des signaux analogiques de 4 à 20 mA ou plusieurs genres de signaux numériques. Le signal de sortie numérique peut être transmis directement à certains processeurs programmables, mais le circuit entre le capteur et le circuit du dispositif de régulation peut exiger des amplificateurs de signal s'il est assez long.

### 3.20 Capteurs d'humidité relative

La plupart des capteurs d'humidité relative sont conçus pour des installations de chauffage et de ventilation commerciales et ne conviennent donc pas aux milieux hostiles. Quelques types de capteurs d'humidité relative, dont le circuit électronique se trouve à l'écart de l'élément primaire, peuvent fonctionner dans certains milieux hostiles. Quoi qu'il en soit, étant donné qu'il est difficile de trouver des capteurs d'humidité fiables, il faut être prudent si l'on élabore un système de régulation basé sur la mesure de l'humidité.

## 4 CONVERTISSEURS DE PHASE

La plupart des installations agricoles ne disposent que de moteurs monophasés parce que le secteur est monophasé en milieu rural. Cependant, une demande de plus en plus forte de moteurs de plus grande puissance a entraîné le besoin de moteurs triphasés, qui offrent plusieurs avantages sur leurs pendants monophasés.

Les moteurs triphasés, particulièrement ceux d'une puissance plus grande que 1,5 kW, offrent un vaste choix de caractéristiques de fonctionnement et coûtent moins cher que les moteurs monophasés de la même puissance. Ainsi, les moteurs triphasés n'ont pas d'enroulement de démarrage et de dispositifs de démarrage, ce qui réduit d'autant les problèmes de réparation et de maintenance. Ils sont en outre plus petits, plus légers et de construction plus simple.

Le remplacement de moteurs monophasés par des moteurs triphasés dans des installations agricoles exige la mise en place de convertisseurs de phase, particulièrement dans les situations suivantes :

- il en coûte plus cher de construire une ligne de secteur triphasée jusqu'à l'installation
- les tarifs de la grille d'alimentation triphasée sont plus élevés que ceux de l'alimentation monophasée
- la charge exige un moteur de grande puissance mais l'appel de courant au démarrage dépasse celui qu'autorise le fournisseur pour le démarrage pleine tension
- une alimentation triphasée temporaire est utilisée jusqu'à l'arrivée de l'alimentation permanente
- un moteur triphasé fait partie intégrante d'un équipement particulier et le remplacement du moteur est difficile, ou coûte cher.

## 5 COMMANDES DE RÉGLAGE DE VITESSE

Jusqu'à tout dernièrement, les commandes de réglage de vitesse les plus courantes nécessitaient l'utilisation d'un moteur doté d'un enroulement spécial et la variation du courant du champ d'excitation grâce à un dispositif à liquide conducteur et à électrodes. La mise au point de semi-conducteurs qui acceptent de fortes tensions et de forts courants a cependant produit des commandes de réglage de vitesse fonctionnant avec des moteurs d'induction ordinaires. Ces dispositifs à semi-conducteurs, dont la puissance peut atteindre 40 kW, sont efficaces et fiables pour les installations de manutention de produits. Les commandes de réglage de vitesse peuvent être utilisées, par exemple, pour des appareils comme les transporteurs, les pompes et les ventilateurs.

Comme ils permettent de régler l'apport de puissance selon les besoins de la charge, les commandes de réglage de vitesse sont plus efficaces que les systèmes de commande de moteur à une seule vitesse. Les commandes de réglage de vitesse limitent aussi l'appel de courant au démarrage, ce qui permet d'utiliser des moteurs plus puissants en milieu rural.

Certains régulateurs de vitesse à semi-conducteurs permettent de raccorder un moteur triphasé à un circuit d'alimentation monophasée. Il est alors plus facile de régler la pression de l'air de séchage des grains, particulièrement dans les installations qui ne disposent que d'une alimentation monophasée. Avec un dispositif de régulation à semi-conducteurs, le courant consommé par le moteur et, par conséquent, le volume d'air soufflé par le ventilateur correspondent tous deux aux besoins du procédé et aux caractéristiques inhérentes de démarrage en douceur des commandes de réglage de vitesse. En agençant ce genre de montage à la possibilité qu'offrent certains systèmes de réglage de vitesse de raccorder une source monophasée à un moteur triphasé, on obtient une solution beaucoup moins coûteuse au problème du séchage des grains que les moyens traditionnels comme les moteurs de petite puissance et les ventilateurs multiples.

Cependant, quand on utilise un dispositif de réglage de vitesse, il faut se méfier des harmoniques que certains de ces dispositifs introduisent dans le circuit d'alimentation. Les autorités interdisent ces parasites. Il faut donc, avant de choisir un appareil de réglage de vitesse, déterminer les harmoniques produites dans le réseau.

# 6 COMMANDES DE MOTEURS

Les démarreurs commandent les moteurs en les mettant sous tension ou en coupant cette tension. Les démarreurs de moteur sont offerts en une grande gamme de coffrets et de tension nominale, pour des moteurs dont la puissance peut aller jusqu'à des milliers de kilowatts. Le choix d'un démarreur doit se faire selon l'environnement dans lequel il doit être utilisé, selon le genre de moteur qu'il doit commander et selon que la commande se fera à distance ou sera automatique.

Le *Code canadien de l'électricité* exige que tous les circuits de moteur soient soumis à une protection électrique. Les fusibles ou les disjoncteurs protègent les moteurs contre les courts-circuits. Les disjoncteurs à maximums empêchent le chauffage excessif des moteurs. Le Code précise aussi la capacité des disjoncteurs et des disjoncteurs à maximums installés dans les démarreurs de moteur.

Si une grande installation comporte plusieurs moteurs, il peut être économique de la doter d'un centre de commande de moteurs. Ce centre regroupe des démarreurs combinés en un seul lieu près d'un circuit d'alimentation commun et permet l'installation de simples interrupteurs près des moteurs ou encore directement au centre de commande. Les centres de commande de moteurs sont offerts en divers types de coffrets, y compris les coffrets anti-déflagrants; cependant, la plupart des systèmes sont conçus de façon que le centre de commande des moteurs soit installé dans un endroit où l'environnement est sûr. Dans les milieux poussiéreux où il n'y a pas de matières explosives, on peut installer des coffrets EEMAC 12, de l'appellation de l'Electrical and Electronic Manufacturers Association of Canada.

Un démarreur combiné est un appareil comprenant le démarreur du moteur ainsi que le disjoncteur du moteur.

## 6.1 Disjoncteurs à maximums

Il y a deux genres de disjoncteurs à maximums :

- dispositifs électroniques mesurant le courant consommé par le moteur à l'aide de transformateurs d'intensité
- relais à maximums comportant un fil chauffant par lequel passe le courant que consomme le moteur.

Le disjoncteur à maximums électronique assure un contrôle perfectionné de l'état du moteur. Ce dispositif contrôle le courant consommé par le moteur, mais il peut aussi contrôler d'autres paramètres comme la température des enroulements et des roulements. L'appareil, après avoir analysé ces paramètres, peut arrêter le moteur ou l'empêcher de démarrer trop souvent.

Dans le cas du relais à maximums, le courant consommé par le moteur chauffe un fil chauffant. Si la température dépasse un seuil donné, le moteur est automatiquement débranché de son alimentation électrique. Des normes industrielles classent les relais à maximums selon le temps maximum, en secondes, pendant lequel le relais laissera passer un courant de 600 % de son courant nominal avant de couper le circuit. Les relais peuvent appartenir aux classes 10, 20 et 30, la classe 20 étant celle d'utilisation générale.

Le fil chauffant doit être choisi selon l'application. Les tables des fabricants permettent de choisir le fil chauffant de façon qu'il convienne à la grosseur du démarreur et au courant de marche du moteur. Cependant, si le démarreur se trouve dans un endroit dont la température n'est pas la même que celle de l'endroit où se trouve le moteur, il faut choisir le fil chauffant de façon à tenir compte de cet écart.

## 6.2 Démarreurs manuels

Un démarreur manuel arrête automatiquement le moteur s'il se produit une surcharge. Toutes les autres commandes doivent être données à la main.

## 6.3 Démarreurs électromagnétiques

Les démarreurs électromagnétiques permettent de commander le fonctionnement des moteurs depuis plusieurs endroits. La commande peut être manuelle, automatique ou mixte.

Un démarreur consiste habituellement en un jeu de contacts transmettant le courant au moteur. D'autres contacts (ouverts ou fermés au repos) ajoutés au démarreur peuvent être raccordés à d'autres circuits de commande et servir de verrouillage entre les moteurs ou de contrôle à distance de l'état du moteur. Ces contacts peuvent aussi faire fonctionner d'autres appareils comme des vannes ou des obturateurs.

## 6.4 Démarreurs inverseurs

Les démarreurs inverseurs, manuels ou électromagnétiques, sont habituellement utilisés avec les moteurs triphasés. L'inversion du sens de rotation des moteurs triphasés se fait habituellement en interchangeant deux ou trois conducteurs du circuit d'alimentation du moteur.

Les démarreurs inverseurs comportent habituellement six jeux de contacts de fort courant : trois des jeux de contacts se ferment pour faire tourner le moteur dans un sens; les trois autres le font tourner dans l'autre sens. Un dispositif de verrouillage mécanique du démarreur inverseur manuel empêche les deux ensembles de jeux de contacts de se fermer en même temps.

Les démarreurs inverseurs magnétiques sont dotés, en plus des six habituels jeux de contacts à fort courant, de deux relais et d'au moins deux contacts auxiliaires fermés au repos, le contact auxiliaire d'un relais étant en série avec la bobine de l'autre relais. Ces contacts auxiliaires empêchent ainsi l'alimentation simultanée des deux bobines. Les démarreurs inverseurs magnétiques sont aussi dotés de dispositifs de verrouillage mécaniques et électriques.

## 6.5 Démarreurs à tension réduite

L'appel de courant au démarrage d'un moteur électrique peut être six fois plus grand que son courant de marche normal. Ce fait peut accroître la demande à un niveau inacceptable, particulièrement avec des moteurs de forte puissance. Le démarreur à tension réduite lance le moteur à basse vitesse pour ensuite porter graduellement sa vitesse au maximum. Le couple de démarrage est alors réduit.

Trois facteurs influent sur l'utilisation des démarreurs à tension réduite :

- tension—à puissance égale, un moteur de tension plus élevée consomme moins de courant
- capacité de l'entrée électrique
- exigence du fournisseur d'électricité.

Il y a deux types de configuration de démarrage à tension réduite : transition ouverte et transition fermée. En transition ouverte, il y a coupure momentanée du courant pendant le passage du démarrage à la marche. La commutation en est d'autant plus simple.

Cependant, la coupure momentanée du courant qui se produit au moment de la transition ouverte peut causer une pointe transitoire de fort courant. Ces parasites peuvent provoquer une panne de secteur ou le mauvais fonctionnement d'appareils délicats comme les ordinateurs ou d'autres appareils de commande électroniques. Le choix d'un démarreur à tension réduite et transition ouverte exige beaucoup de soins.

Les démarreurs à transition fermée, par contre, ne permettent pas la coupure du courant. Les contacts du démarreur sont agencés de façon que les étapes de démarrage et de marche se chevauchent.

Les démarreurs à tension réduite les plus courants sont les suivants :

- démarreurs étoile – triangle
- démarreurs à autotransformateur
- démarreur à résistance primaire
- démarreur à enroulement partiel
- démarreur à semi-conducteur
- démarreur à réglage de vitesse.

6.6 *Démarreurs étoile – triangle* Les démarreurs étoile – triangle exigent des moteurs à bobinage spécial. On les utilise dans des applications pour lesquelles un faible couple de démarrage est acceptable, par exemple pour des charges à forte inertie ou s'il faut une longue durée d'accélération.

6.7 *Démarreurs à autotransformateur* Les démarreurs à autotransformateur peuvent être utilisés avec tout moteur à cage d'écureuil ordinaire; l'appel de courant est réglé en changeant le conducteur de prise de l'autotransformateur. Il ne faut pas oublier que plus l'appel de courant est faible, plus le couple de

démarrage est faible. L'autotransformateur offre le couple de démarrage le plus élevé par ampère de l'alimentation.

6.8 *Démarreurs à résistance primaire* Ces démarreurs fonctionnent comme les démarreurs à autotransformateur, sauf que l'appel de courant est limité par une résistance plutôt que par l'enroulement du transformateur.

6.9 *Démarreurs à enroulement partiel* Les démarreurs de ce genre sont utilisés avec un moteur à démarrage par enroulement partiel afin de réduire l'appel de courant à 60 % environ du courant normal. Ces démarreurs conviennent particulièrement aux applications exigeant un faible couple de démarrage.

6.10 *Démarreurs à semi-conducteurs* Pour les moteurs triphasés à cage d'écureuil ordinaire, on utilise les démarreurs à semi-conducteurs fonctionnant à tension réduite. Ces démarreurs font appel à des semi-conducteurs de puissance pour conserver la puissance consommée constante jusqu'à ce que le moteur atteigne sa pleine vitesse. L'opérateur peut régler le courant de démarrage à une valeur se situant entre 30 et 80 % de l'appel de courant normal.

6.11 *Démarreurs à réglage de vitesse* Les dispositifs de réglage de vitesse fonctionnent aussi comme démarreur à tension réduite, bien que les commandes de réglage de vitesse soient plus complexes et plus chers que les démarreurs ordinaires. Les démarreurs à réglage de vitesse s'utilisent quand l'application exige un réglage de vitesse et un démarrage à tension réduite.

# 7 EXEMPLES DE CIRCUITS DE COMMANDE

Le présent chapitre illustre comment raccorder divers composants afin d'en arriver à produire des appareils de commande. Les exemples portent sur les six circuits suivants :

- commande de marche-arrêt de moteur
- commandes de temporisation
- circuit d'alternance
- circuit de pas à pas
- circuit conditionneur de signal
- circuit de commutation analogique.

## 7.1 Commandes de marche-arrêt de moteur

Presque tous les systèmes de régulation comportent une commande de marche-arrêt de moteur (fig. 1), le circuit à relais le plus simple.

Le bouton de marche, un contact momentané ouvert au repos, laisse passer le courant quand il est enfoncé. Le bouton d'arrêt, un contact momentané fermé au repos, laisse passer le courant sans arrêt, jusqu'à ce qu'il soit enfoncé.

Lorsque l'opérateur appuie sur le bouton de marche, le courant passe par le contact de marche ainsi que par le contact d'arrêt et alimente la bobine du relais. Un contact du relais se ferme alors et laisse passer le courant vers la bobine par l'intermédiaire du contact d'arrêt. Donc, si l'on relâche le bouton de marche, le contact du relais continue de laisser passer le courant qui alimente la bobine du relais. En fait, le relais reste sous tension jusqu'à ce que le bouton d'arrêt soit enfoncé pour couper le courant. En relâchant le bouton d'arrêt, cependant, le relais n'est plus sous tension puisque le contact du relais est ouvert, ce qui coupe le circuit d'alimentation.

Le contact de ce genre de circuit est souvent appelé contact de maintien, ou d'entretien, et le circuit, circuit de maintien. S'il survient une panne de courant, le circuit n'est plus alimenté et ne le sera pas tant que l'on n'appuiera pas sur le bouton de marche.

Les circuits de marche-arrêt commandent aussi d'autres dispositifs, dont l'appareil de régulation de niveau à différentiel. Dans l'appareil de régulation de niveau, des contacts de niveau remplacent les boutons de marche et d'arrêt, l'un commandant la marche et l'autre l'arrêt.

## 7.2 Circuits de temporisation

Les deux sortes de circuits de temporisation les plus courants sont :

- les circuits à retard à l'amorçage
- les circuits à retard au désamorçage.

7.3 *Circuits à retard à l'amorçage* Un circuit à retard à l'amorçage amorce (ou désamorce) un dispositif après un retard donné suivant l'amorçage d'un autre dispositif. Ainsi, un circuit à retard à l'amorçage retarde la fermeture d'une vanne de dérivation jusqu'après le lancement de la pompe (fig. 2).

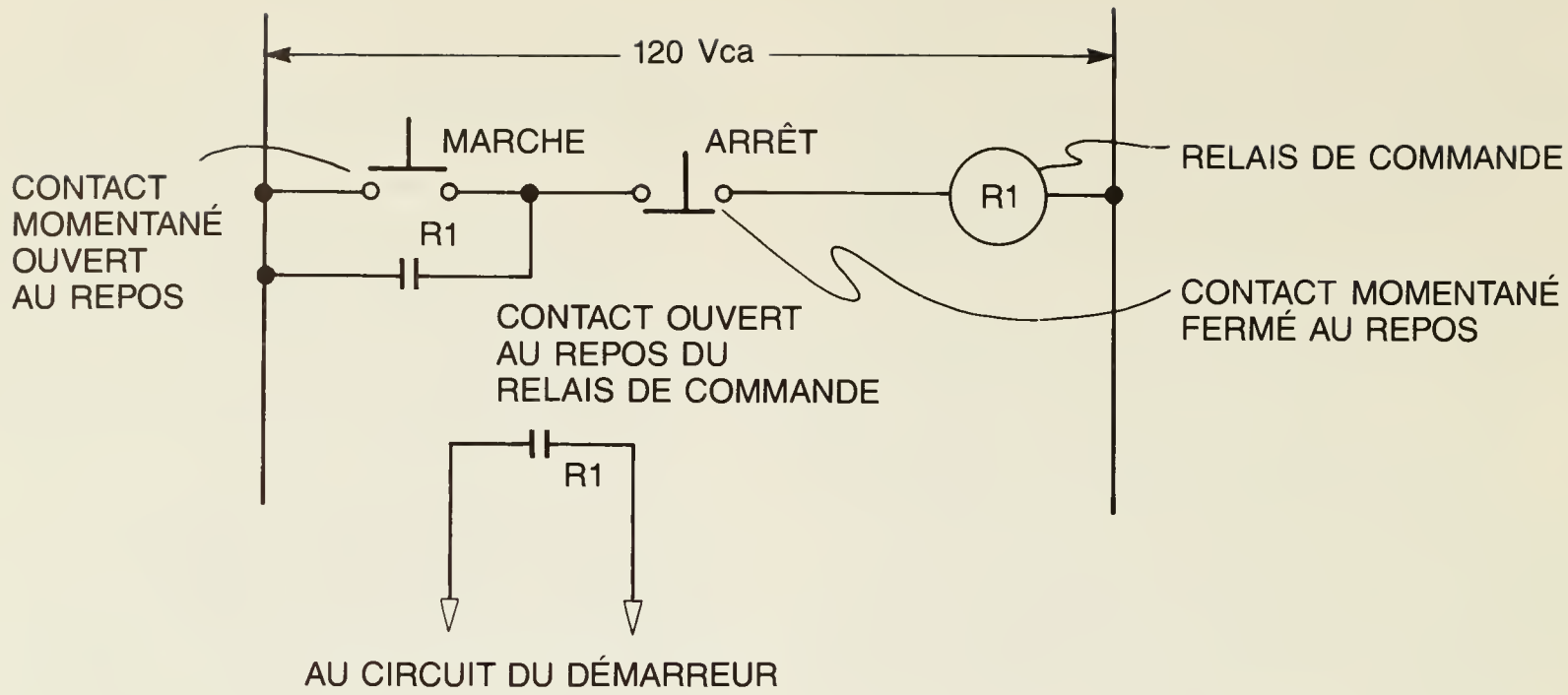



**Fig. 1. Commande de marche-arrêt de moteur**

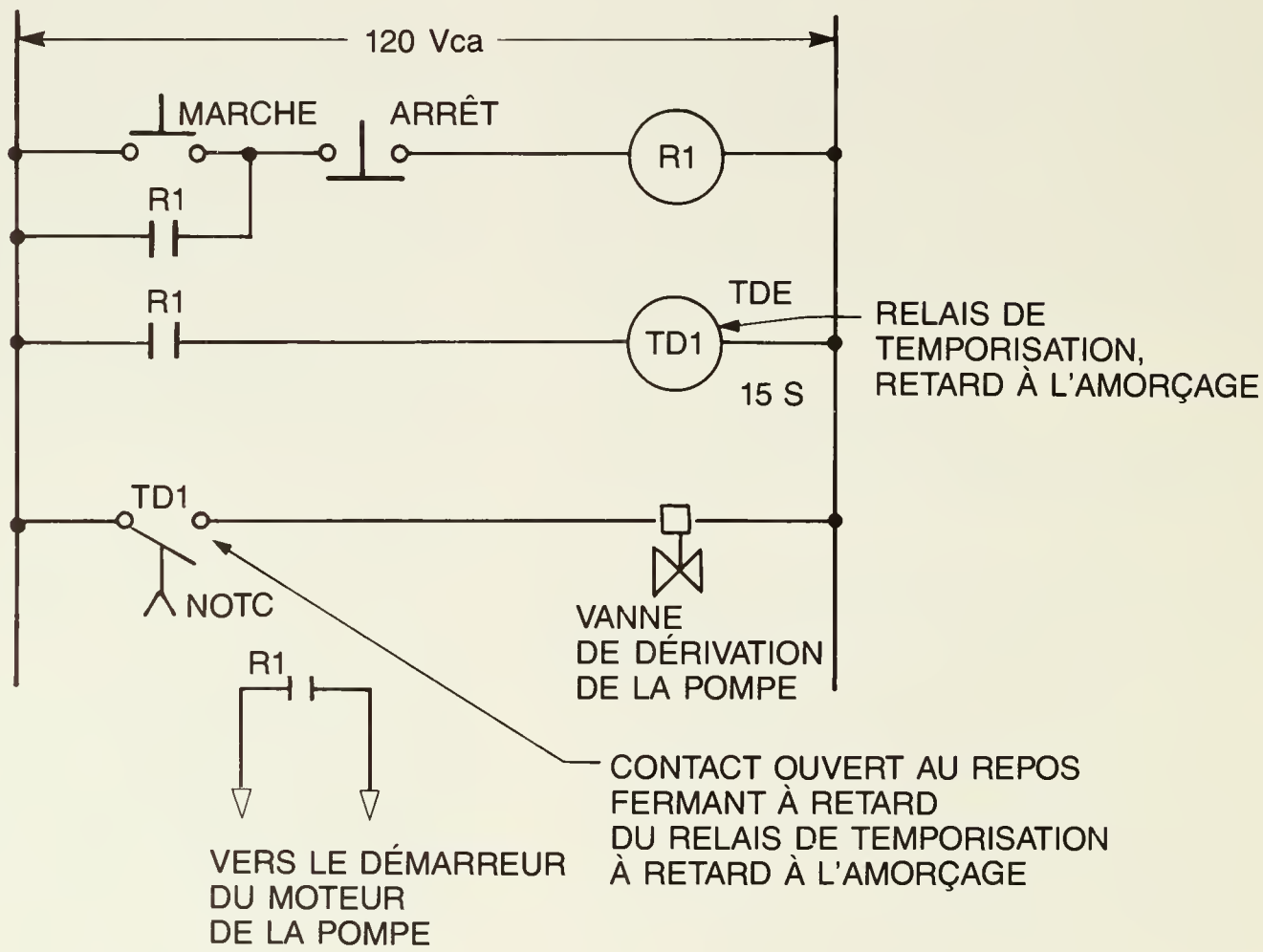



**Fig. 2. Circuit de dérivation de pompe**

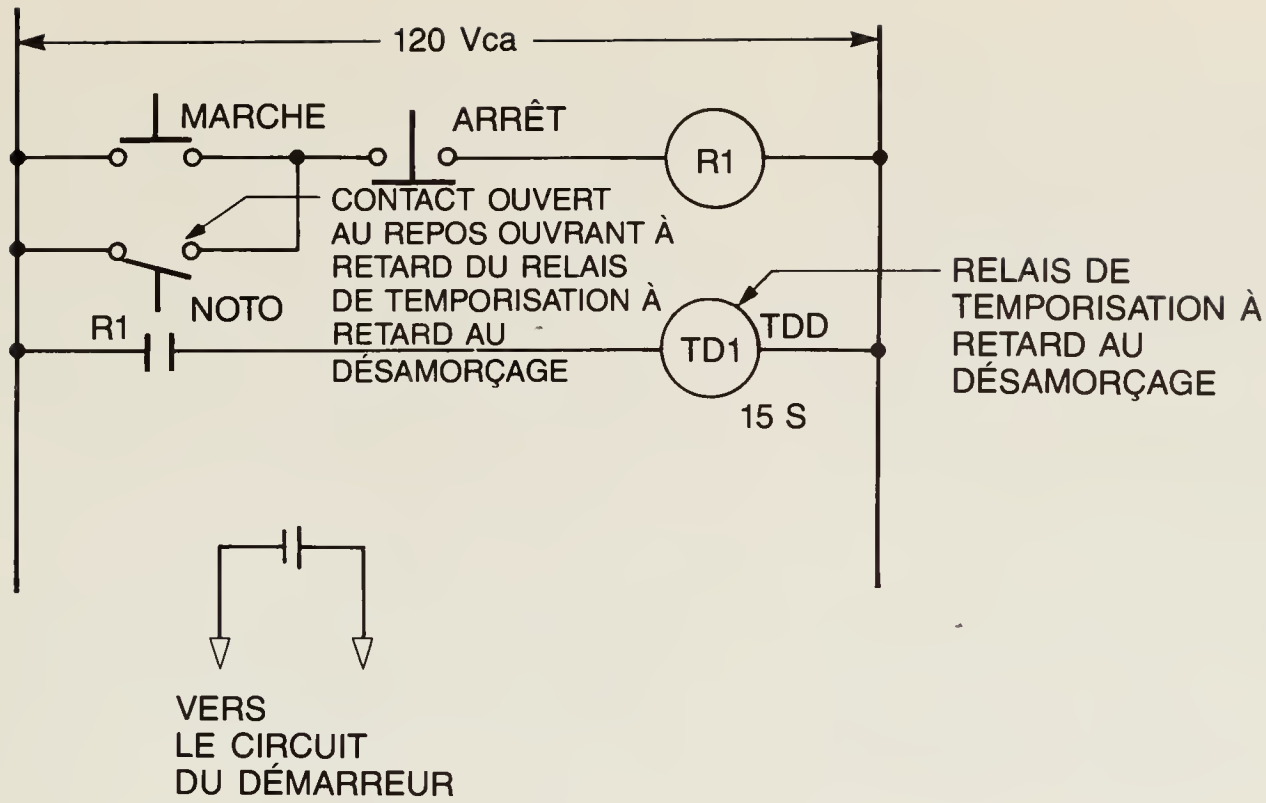



**Fig. 3. Circuit de remise en marche**

7.4 *Circuits à retard au désamorçage* On utilise un circuit à retard au désamorçage si l'on désire qu'un dispositif soit amorcé ou désamorcé après un retard donné suivant le désamorçage d'un autre dispositif. Le circuit de redémarrage d'un moteur est un exemple de ce genre de circuit. Un circuit électropneumatique de retard au désamorçage raccordé au circuit d'un moteur permet au circuit de marche-arrêt de rester actif pendant un certain temps après une panne de courant. Dans ce circuit, le bouton de marche alimente un relais de temporisation dont un contact fermé au repos est placé en dérivation du bouton de marche. S'il y a panne de courant, le contact reste fermé jusqu'à ce que le relais dépasse le retard prévu. Si le courant est rétabli avant la fin du retard, le circuit est remis sous tension (fig. 3).

## 7.5 Circuits d'alternance

Pour certaines applications, deux moteurs se partagent la charge en alternance. Supposons un système de compresseur à air à deux moteurs (fig. 4). Chaque fois que le pressostat commande la mise en marche d'un moteur, le circuit choisit le moteur qui n'a pas fonctionné à la dernière mise en marche.

Avec les relais électromagnétiques, on applique habituellement cette logique en utilisant une paire de contacts spéciale. La paire de contacts comprend un contact fermé au repos et un contact ouvert au repos. Ils sont agencés de façon que, lorsque le relais est amorcé ou désamorcé, l'un des contacts ferme avant que l'autre ouvre. Sur la figure 4, le relais R1 alimente le moteur 1 et le relais 2 alimente le moteur 2. Le relais 3 conserve

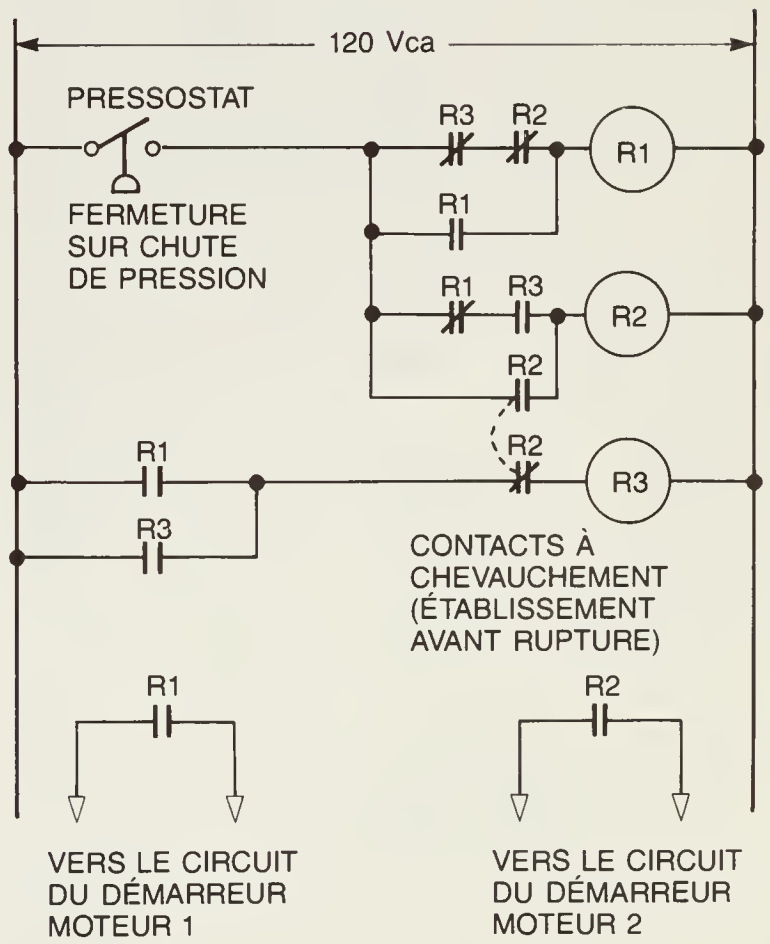



**Fig. 4. Circuit d'alternance**

l'information, si le moteur 1 a été le dernier à fonctionner. Quand le pressostat alimente le circuit la première fois, R3 et R2 sont tous deux désamorcés et le courant atteint la bobine de R1. R2 ne peut pas être amorcé au début parce que R3 n'est pas alimenté, donc le contact de R3 ne peut pas laisser passer le courant. Lorsque R1 est amorcé, R3 est aussi amorcé et le demeure grâce à son contact de maintien. Enfin, lorsque le pressostat ouvre, indiquant que la pression est assez élevée dans le réservoir, R1 est désamorcé, mais R3 reste amorcé grâce à son contact de maintien.

Lorsque le circuit à relais est de nouveau alimenté, le relais R3 empêche l'alimentation de R1. R2 est alors amorcé et le demeure grâce à un contact de maintien de R2 relié en parallèle avec les contacts de R3 et de R1. Lorsque R2 est amorcé, R3 est désamorcé parce que le contact de R2, un contact fermé au repos, ouvre. Les contacts de R2 se chevauchent, ce qui permet au relais R2 de fermer son circuit de maintien avant que le contact de R3 ouvre. Sans ce chevauchement, R2 et R3 tenteraient d'ouvrir simultanément, ce qui donnerait des résultats imprévisibles. Les processeurs programmables aident à éviter tout résultat imprévisible à cause de la manière dont ils résolvent la logique (voir section 2.23).

## 7.6 Circuits de pas à pas

Un sélecteur pas à pas comprend deux jeux ou plus de contacts ouverts au repos. Ces jeux de contacts ferment individuellement chaque fois que la bobine du sélecteur est amorcée et désamorcée.

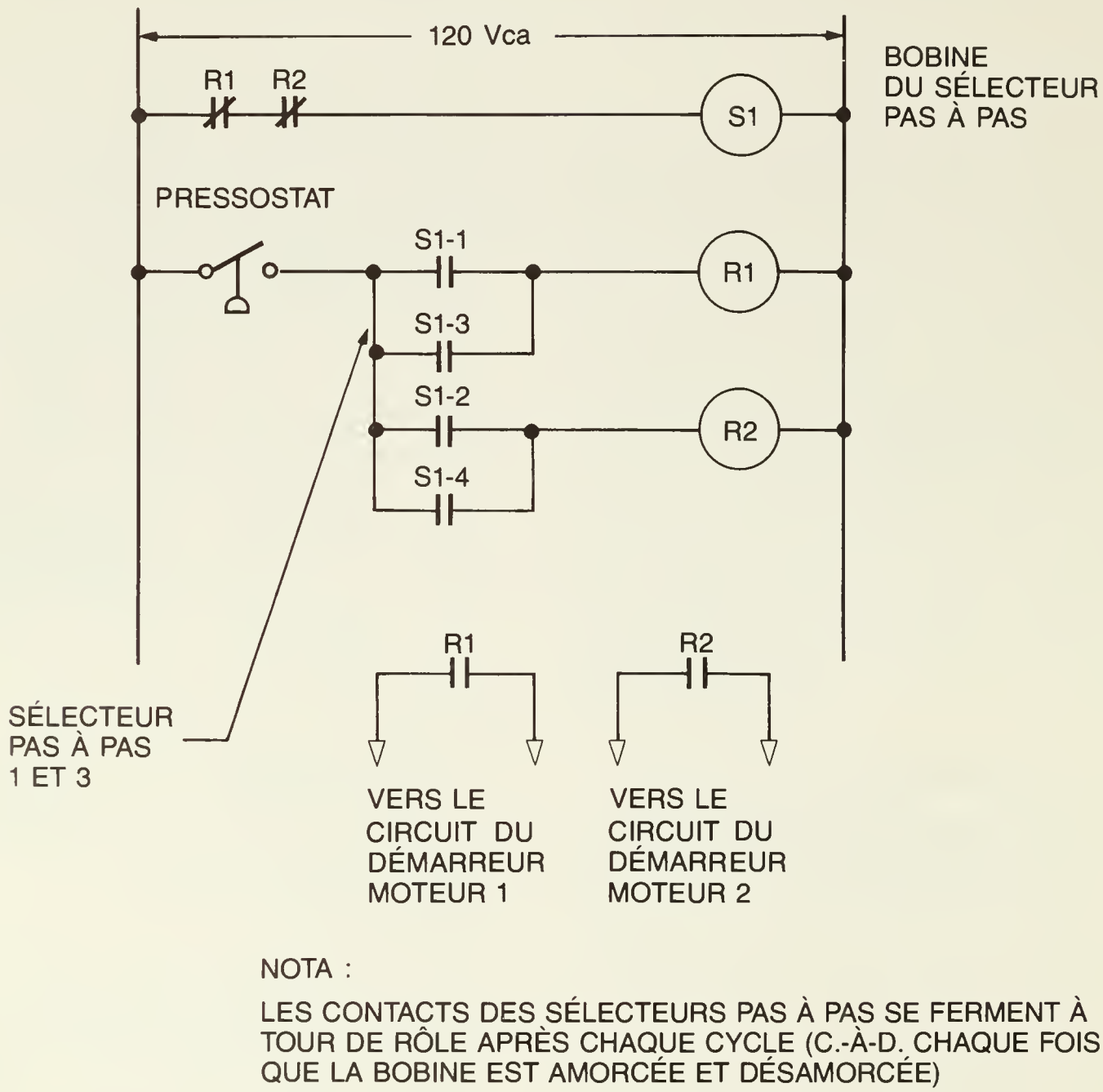



Fig. 5. Circuit de sélecteur pas à pas

Un circuit de pas à pas peut remplacer le circuit d'alternance dans le système de compresseur à air décrit à la section 7.5. Si un circuit à deux pas était utilisé dans ce système, la bobine du sélecteur pas à pas serait branchée directement au pressostat. Les deux contacts de sortie du sélecteur seraient aussi branchés au pressostat. Par conséquent, chaque contact serait raccordé aux deux circuits de moteur du compresseur à air. Chaque fois que le pressostat fonctionne, le sélecteur pas à pas ouvre un jeu de contacts de sortie et ferme l'autre.

Les contacts de sélecteurs à contacts multiples pourraient être raccordés en alternance aux deux moteurs. La figure 5 illustre la manière de raccorder un sélecteur à quatre pas pour faire fonctionner deux moteurs en alternance.

## 7.7 Circuits conditionneurs de signal

Le signal des capteurs analogiques doit souvent être modifié ou amplifié pour être utilisé par un circuit de régulation. La figure 6, par exemple, illustre un détecteur de température à résistance raccordé à un conditionneur de signal résistance-courant. La sortie du conditionneur, un signal de 4 à 20 mA, est raccordée à un compteur. Un signal de 4 mA donne, sur l'échelle de ce dernier, une indication de 0 °C et un autre de 20 mA donne 100 °C. À l'aide de deux potentiomètres (réglage du zéro et réglage de la sensibilité), on règle le conditionneur de signal de façon que les valeurs affichées sur le compteur correspondent au signal du détecteur de température à résistance.

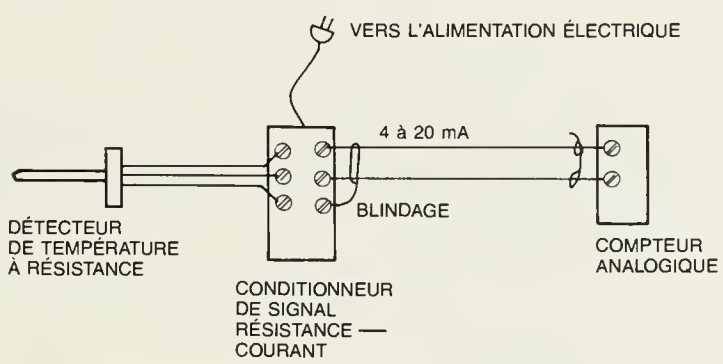



**Fig. 6. Circuit de conditionnement de signal (détecteur de température à résistance)**

D'autres situations de mesure peuvent exiger un tel conditionnement du signal; ce sont, entre autres :

- courant consommé par un moteur; un conditionneur courant-courant permet de relier la sortie d'un transformateur d'intensité au circuit de commande du moteur
- vitesse de rotation d'un arbre; un conditionneur fréquence-courant est raccordé à un contacteur tachymétrique
- poids; un conditionneur tension-courant est relié à une jauge extensométrique dont le signal de sortie est de l'ordre des millivolts.

## 7.8 Circuits de commutation analogique

Les contacts de proximité, raccordés à des conditionneurs de signal, peuvent provoquer l'ouverture (ou la fermeture) de contacts de sortie basée sur un signal d'une intensité donnée (en milliampères) (fig. 7). Ces circuits de commutation analogiques peuvent servir à commander des circuits comprenant des contacts de température, des contacts de mesure de vitesse, des contacts de surintensité ou des contacts déclenchés par le poids.

La figure 8 illustre un contact de commutation analogique de mesure de vitesse installé sur un système de commande d'élévateur à godets. Le contact provoque l'arrêt du moteur de l'élévateur si la vitesse de l'élévateur est inférieure à une valeur donnée. Dans cet exemple, le relais R1 est amorcé lorsque l'opérateur appuie sur le bouton de marche. Le relais de temporisation TD1 est aussi alimenté lorsque le relais R1 est amorcé et il commence à compter le retard prévu. Si le signal de vitesse produit par le conditionneur fréquence-courant est d'au moins 12 mA, le contact du commutateur analogique ouvre son contact de sortie et coupe l'alimentation du TD1, ce qui empêche le TD1 d'ouvrir son contact dans le circuit de la bobine du relais R1. Cependant, si le contact du commutateur analogique ne s'ouvre pas dans les cinq secondes qui suivent le démarrage du moteur, le TD1 ouvre le circuit de la bobine de R1, ce qui provoque l'arrêt du moteur jusqu'à ce que l'on appuie sur le bouton de marche.

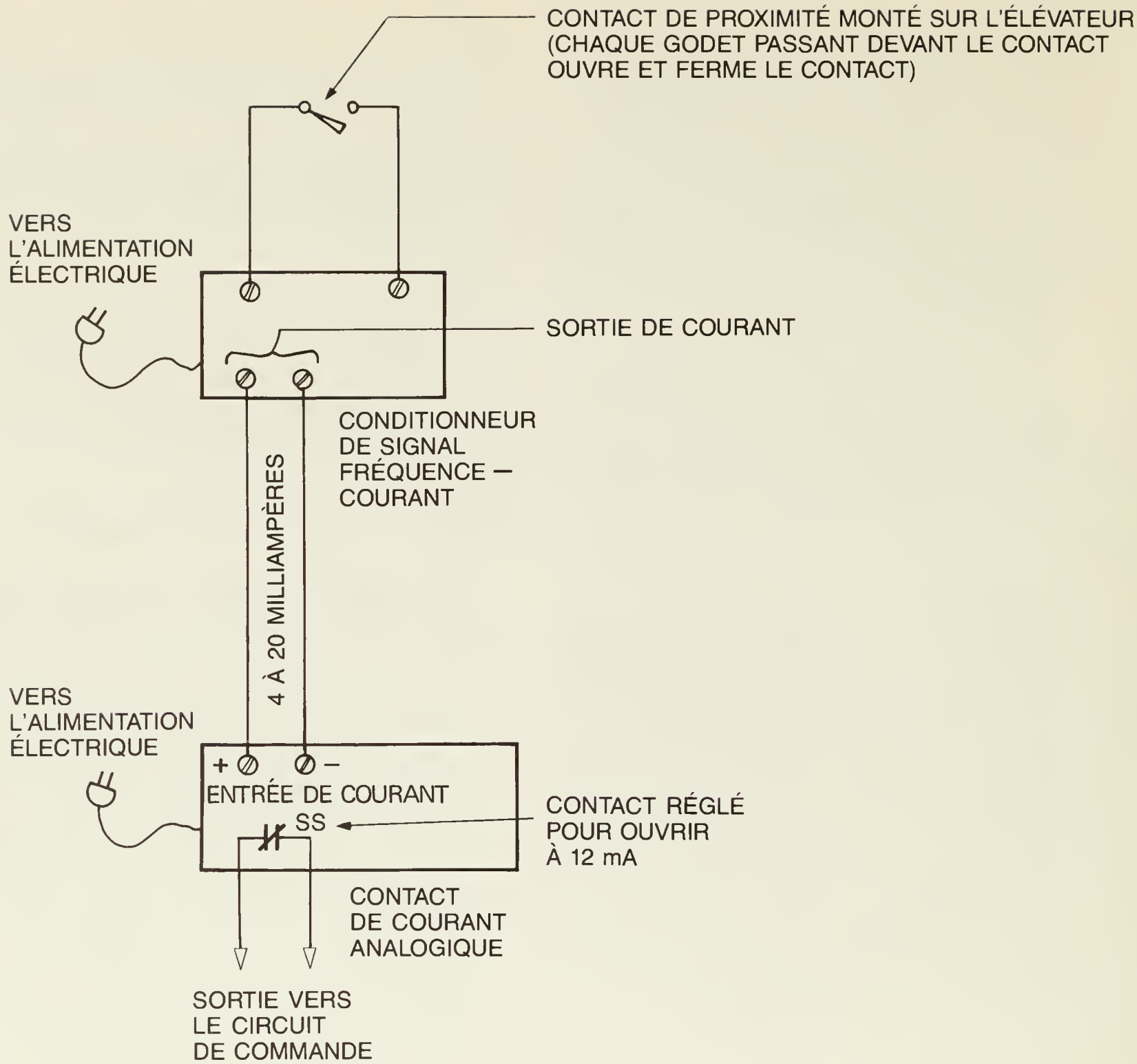



**Fig. 7. Câblage détaillé du circuit de signaux analogiques**

## 8 SCHÉMAS DE CIRCUIT

La conception de systèmes de régulation exige l'utilisation de plusieurs genres de schémas. Les quatre plus courants sont les suivants :

- ordinogrammes logiques
- schémas en échelle
- schémas de câblage
- schémas de boucle.

### 8.1 Ordinogrammes logiques

La première étape de la conception d'un système de régulation consiste à produire un ordinogramme logique. Les ordinogrammes identifient toutes les étapes d'une régulation séquentielle. Les ordinogrammes sont utiles à plus d'une fin pour les concepteurs de systèmes de régulation :

- identifier chaque appareil et dispositif nécessaire
- déterminer le nombre d'entrées et de sorties
- déterminer les caractéristiques des appareils de temporisation nécessaires
- préciser les relations entre les divers signaux d'entrée et de sortie.

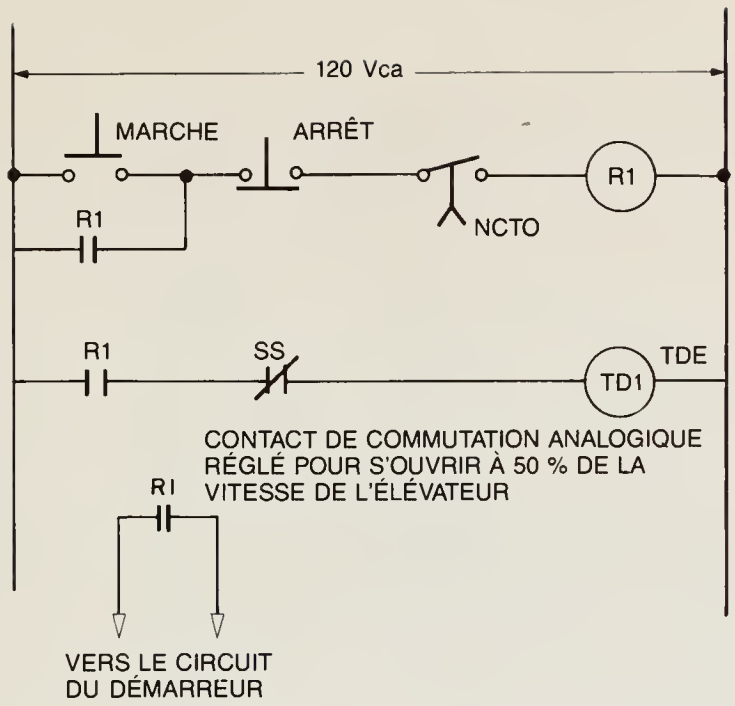



**Fig. 8. Circuit de commande de l'élévateur à godets**

En outre, les personnes qui ne connaissent pas très bien les appareils électriques et électroniques ni les schémas de câblage peuvent utiliser les ordinogrammes pour étudier la portée du système de régulation.

Les ordinogrammes peuvent être aussi simples que le sommaire très élémentaire d'un système et aussi compliqués que la description détaillée de chaque élément d'un système de régulation. La quantité des détails dépend de la complexité du système de régulation, du nombre d'enchaînements de commandes et de contrôles interdépendants et du besoin d'expliquer le système à des personnes qui ne connaissent pas tellement le domaine de la conception des installations électriques. L'expérience du concepteur du système influe aussi sur la forme qu'aura l'ordinogramme. En effet, pour les concepteurs expérimentés, les ordinogrammes ne sont nécessaires que dans le cas des systèmes les plus complexes.

La figure 9 illustre l'installation mécanique d'un système simple pour un transporteur. Le système de régulation doit contrôler le niveau à l'intérieur du silo de destination et arrêter le transporteur lorsque les grains atteignent le niveau maximum établi. Le transporteur est conçu de façon que, si la vanne du silo 1 est fermée, le transporteur amène automatiquement les grains au silo 2. Si l'arbre du transporteur s'arrêtait de tourner, le moteur d'entraînement du transporteur doit s'arrêter.

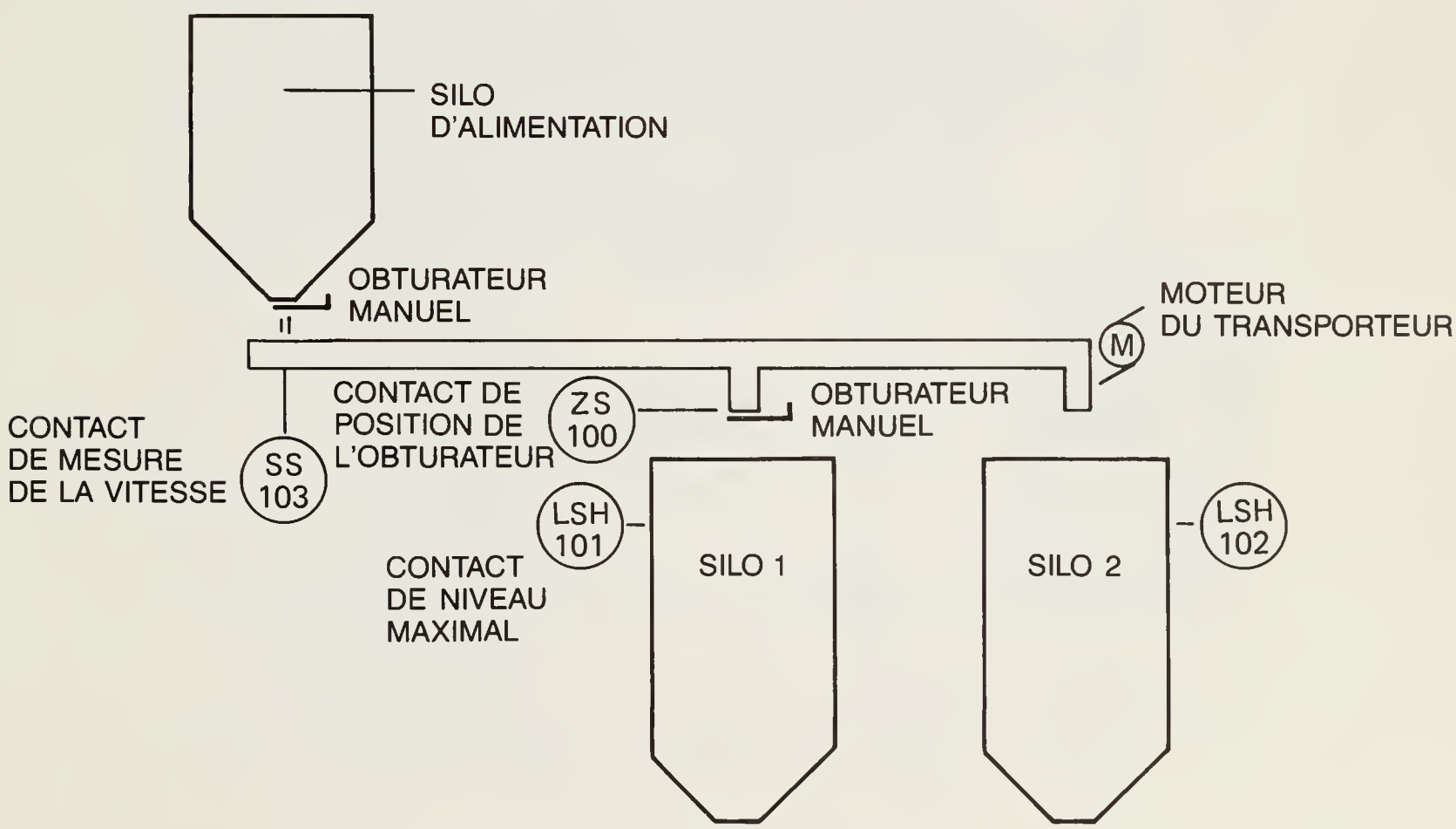



**Fig. 9. Agencement des organes mécaniques du système du transporteur**

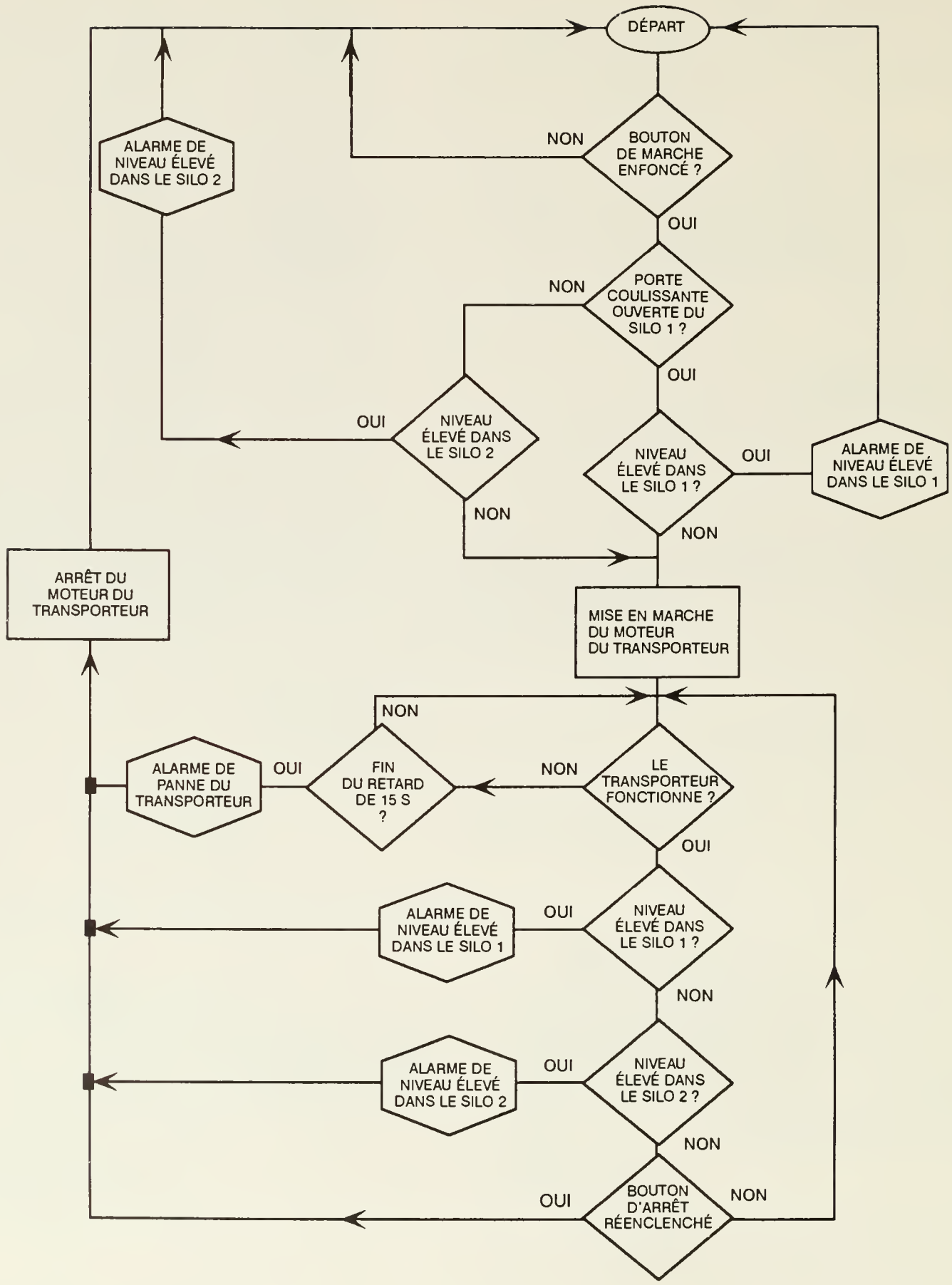



Fig. 10. Ordinogramme du système de transfert entre les silos

L'ordinogramme de ce système (fig. 10) détermine les fonctions logiques à remplir pour satisfaire aux critères du système.

## 8.2 Schémas en échelle

Les schémas en échelle donnent une représentation schématique du câblage des éléments d'un système de régulation ainsi que

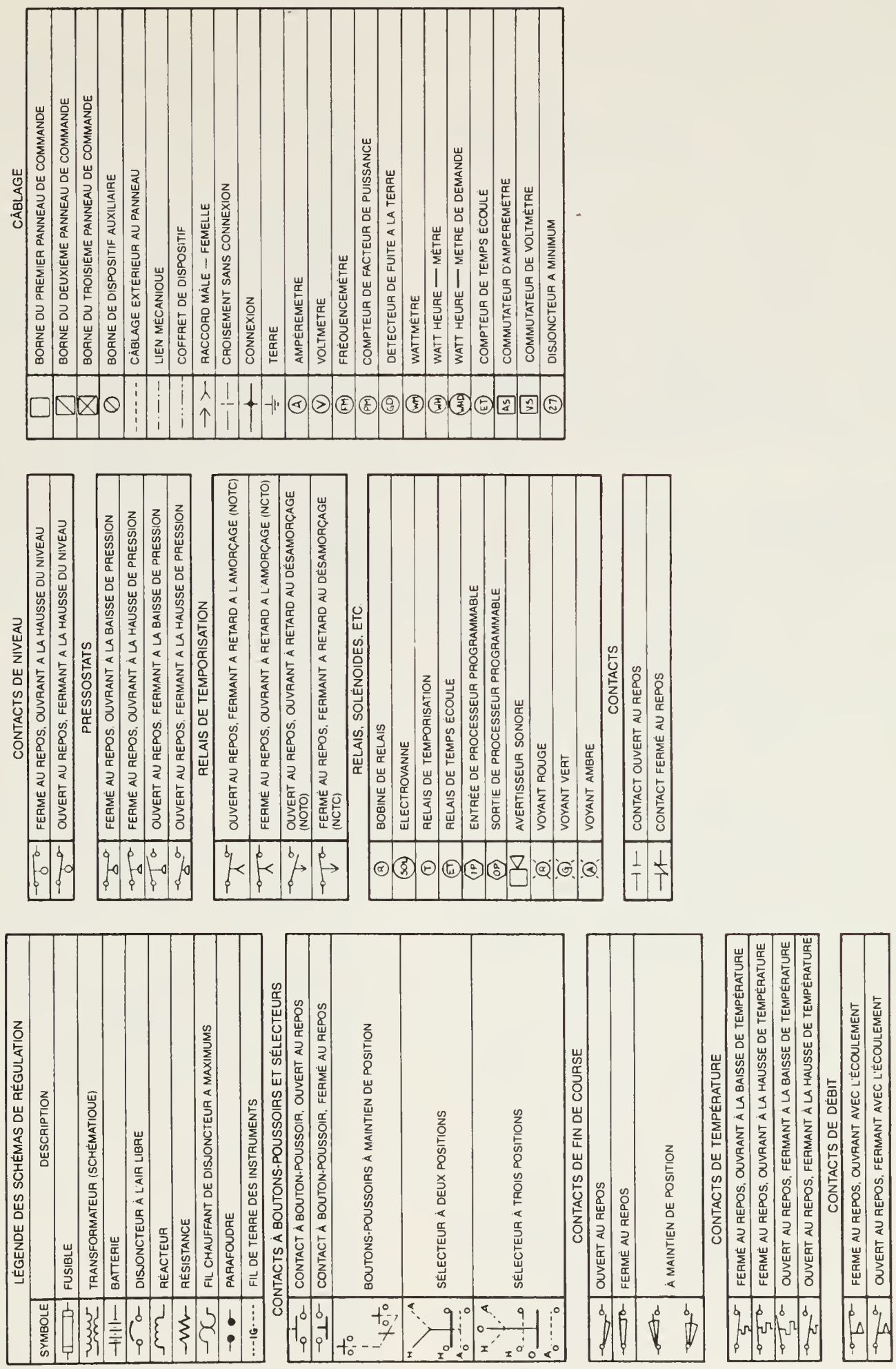



**Fig. 11. Symboles des schémas en échelle**

les interconnexions entre elles. Le concepteur élabore ce schéma après avoir choisi tout le matériel du système. Les schémas en échelle ne montrent pas l'emplacement physique des éléments ni leurs dimensions relatives.

Il y a plusieurs manières conventionnelles pour représenter, sur les schémas en échelle, les bobines de relais, les contacts, les relais de temporisation et les sélecteurs pas à pas, ainsi que les points de raccordement. La figure 11 donne le tableau des symboles les plus couramment utilisés. Habituellement, les lignes continues représentent des fils à l'intérieur du tableau de commande, tandis que les pointillés représentent le câblage extérieur.

La figure 12 illustre le schéma en échelle du système de commande du transporteur de la figure 9. Le schéma en échelle est agencé de façon que les divers éléments composent les barreaux et que les fils de l'alimentation électrique, le fil sous tension et le fil du neutre, forment les montants de l'échelle. Chaque «barreau» reçoit un numéro de ligne qui sert à plusieurs fins :

- renvois des contacts des relais
- identification des bobines de relais et de relais de temporisation
- identification des bornes.

Sur la figure 12, par exemple, le R101 désigne une bobine de relais se trouvant sur la ligne 101 du schéma en échelle. L'emplacement de chacun des contacts du relais est indiqué à la droite de la bobine du relais. Les numéros soulignés indiquent les contacts fermés au repos et ceux qui ne le sont pas indiquent les contacts ouverts au repos. Les bornes sont numérotées de la même manière. Le numéro de la ligne forme le préfixe du numéro de la borne. La première borne de la ligne 102 porte donc le numéro 1021, la deuxième, 1022, et ainsi de suite. Le symbole du voyant indique un voyant dont la couleur est celle de la lettre inscrite à l'intérieur du symbole (ex. R = rouge).

Pour le système de commande du transporteur (fig. 12), un bouton de contact momentané de la ligne 105 met le transporteur en marche. Si la vanne du silo 1 est entièrement ouverte, le relais 101 est amorcé et le contact R101 de la ligne 105 ferme. Le courant circule du contact de marche au contact R102 fermé au repos en passant par le contact fermé au repos d'arrêt du transporteur. Le contact R102 de la ligne 105 ferme seulement si le contact de niveau élevé LSH101 de la ligne 102 n'est pas fermé et, par conséquent, lorsque le relais R102 n'est pas amorcé. Si l'obturateur du silo 1 n'est pas ouvert, le contact R101 fermé au repos de la ligne 106 laisse passer le courant jusqu'au contact R103 du relais de niveau élevé du silo 2, de la ligne 106. Donc, si l'obturateur du silo 1 est ouvert et que le niveau élevé n'est pas atteint dans ce silo, ou si l'obturateur du silo 1 n'est pas ouvert et que le niveau n'est pas élevé dans le silo 2, le relais de temporisation T108 de la ligne 105 est mis sous tension.

Le relais de temporisation, sur la ligne 108, n'actionne pas ses contacts pendant les 15 secondes qui suivent la mise sous tension de sa bobine. Par conséquent, le relais R105 est amorcé, ce qui entraîne la mise en marche du moteur du transporteur par l'intermédiaire du contact R105 ouvert au repos, sur la ligne 108. Quand le relais R105 est mis sous tension, le contact ouvert au repos R105 de la ligne 106 ferme. Cette fermeture a le même effet que le bouton de marche; donc, lorsque le contact de départ est relâché, le relais R105 assure l'alimentation de sa propre bobine jusqu'à ce que le circuit soit coupé par l'un ou l'autre des éléments des lignes 105 ou 106.

Le relais de temporisation T108 commence à épuiser son retard à moins que le contact de détection de vitesse ne s'ouvre pour indiquer que la courroie est en mouvement. Si ce contact ne s'ouvre pas, le T108 atteint la fin de son retard 15 secondes après le démarrage du moteur du transporteur. Le contact fermé au repos du T108 s'ouvre alors, à la ligne 105, ce qui coupe l'alimentation de la bobine du relais R105.

En même temps, les contacts ouverts au repos du T108 ferment sur les lignes 109 et 114. Par conséquent, la tension continue d'alimenter l'élément de temporisation du T108, sur la ligne 108, et le voyant rouge «Panne du transporteur» s'allume, sur la ligne 114. Le T108 demeure sous tension jusqu'à ce que le bouton de réenclenchement, fermé au repos, soit enfoncé, à la ligne 109, ce qui permet de remettre en marche le moteur du transporteur.

Trois autres facteurs peuvent déclencher aussi l'arrêt du moteur du transporteur. Si l'obturateur du silo 1 est ouvert et que le niveau élevé est atteint, le relais R105 est désamorcé lorsque le contact R102 s'ouvre, sur la ligne 105. De même, si l'obturateur du silo 1 n'est pas ouvert et que le niveau élevé est atteint dans le silo 2, le relais R105 est désamorcé lorsque le contact R103 s'ouvre, sur la ligne 106. Enfin, si le bouton d'arrêt est enfoncé, le circuit n'est plus alimenté et le relais R105 est désamorcé. Il faut noter que, bien que le bouton de marche ne soit plus enfoncé, le R105 n'est pas réamorcé après que le bouton d'arrêt est relâché parce que le contact R105 de la ligne 106 n'est plus fermé une fois que le relais R105 n'est plus sous tension. Le circuit de la ligne 114 fait allumer le voyant d'alarme «Panne du transporteur».

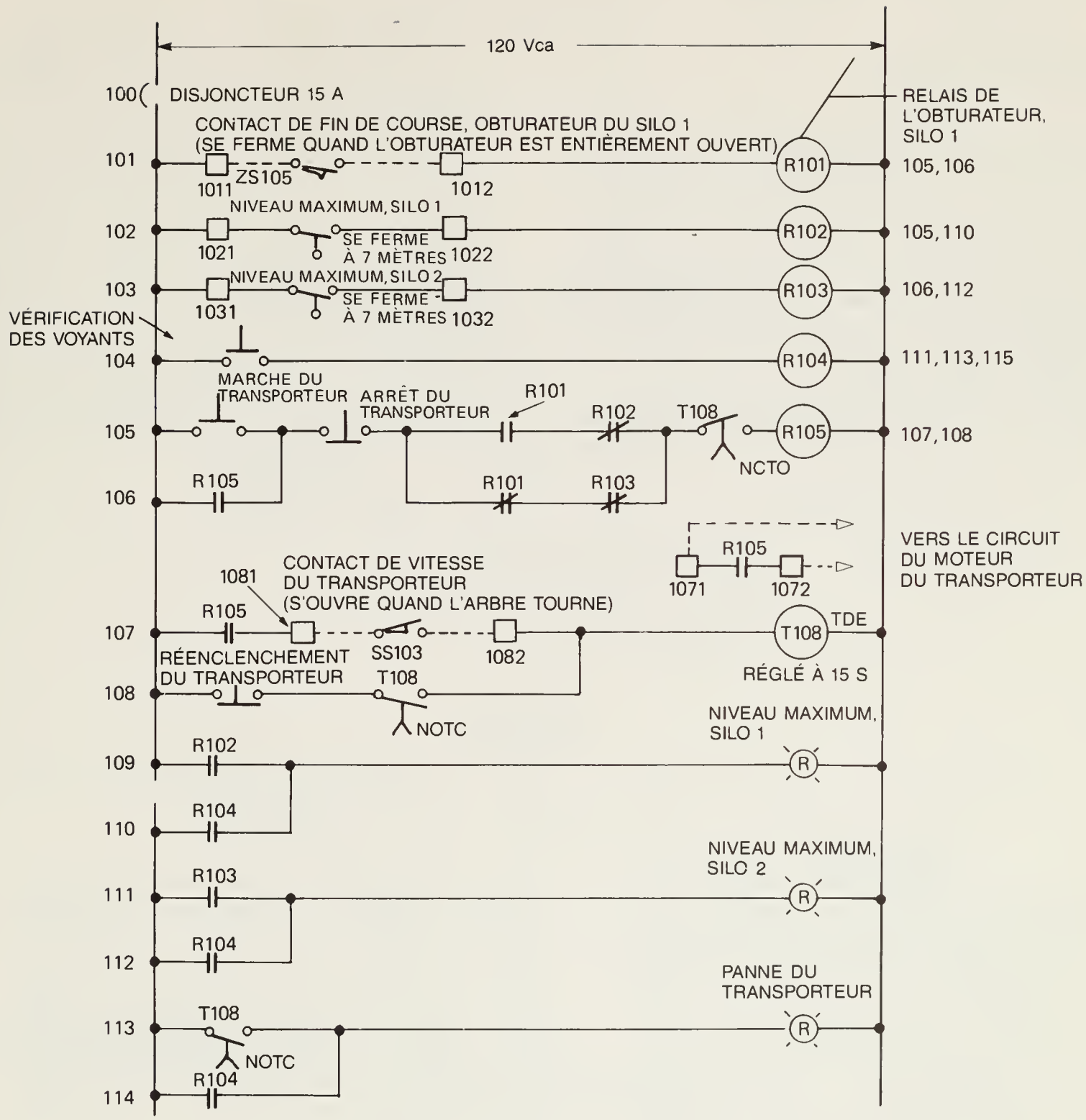



**Fig. 12.** Schéma de principe du système de régulation du transporteur

Le bouton de vérification des voyants de la ligne 104 alimente le relais R104. Ce relais, à son tour, alimente, par les contacts R104 des lignes 111, 113 et 115, les deux voyants «Niveau élevé» et le voyant «Panne du transporteur» qui s'allument.

## 8.3 Schémas de câblage

Le schéma de câblage est une représentation visuelle montrant les endroits par où passent les fils ainsi que le raccordement des éléments du système. Ce schéma découle habituellement du schéma en échelle. Certains concepteurs n'utilisent que le schéma de câblage, particulièrement pour les installations de chauffage et de ventilation ou pour les systèmes de régulation simples (ex. les centres de commande de moteurs pour les appareils).

La figure 13 illustre un schéma de câblage du simple démarreur de moteur du transporteur (fig. 11). Le schéma de principe du même circuit de démarrage est illustré à la figure 14 aux fins de comparaison.

## 8.4 Schémas de boucle

Les schémas de boucle illustrent le câblage des systèmes de régulation analogique. Ces schémas combinent les caractéristiques des schémas de principe et des schémas de câblage. Le schéma de boucle donne une illustration visuelle de tous les éléments, mais donne une représentation plutôt schématique des interconnexions plutôt que de montrer les endroits par où passent les fils. Le schéma de boucle peut servir, par exemple, pour illustrer le câblage d'acheminement des signaux d'entrée et de sortie d'un processeur programmable parce que le terminal de programmation du processeur produit le véritable ordinogramme.

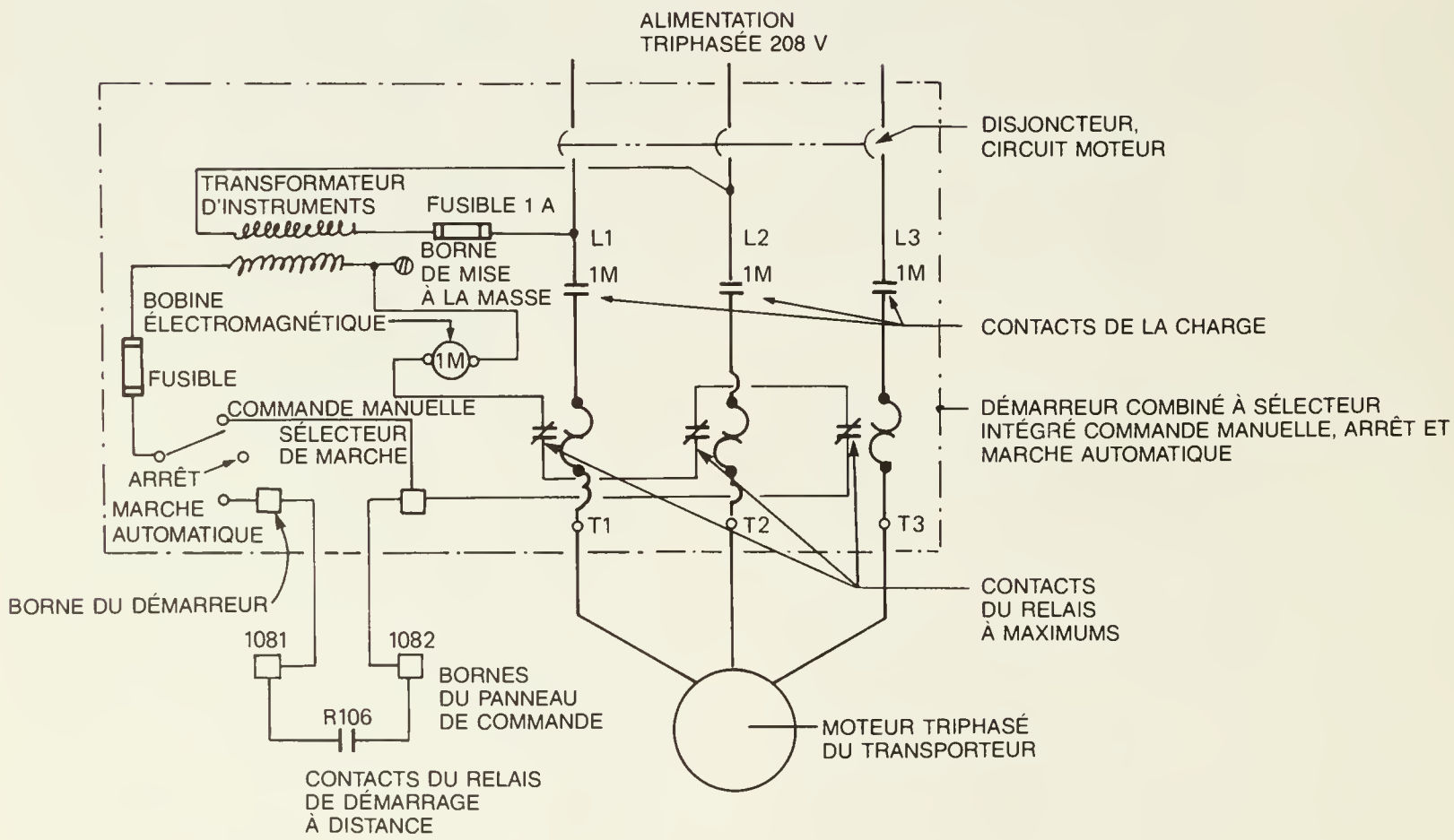



**Fig. 13. Schéma de câblage du démarreur**

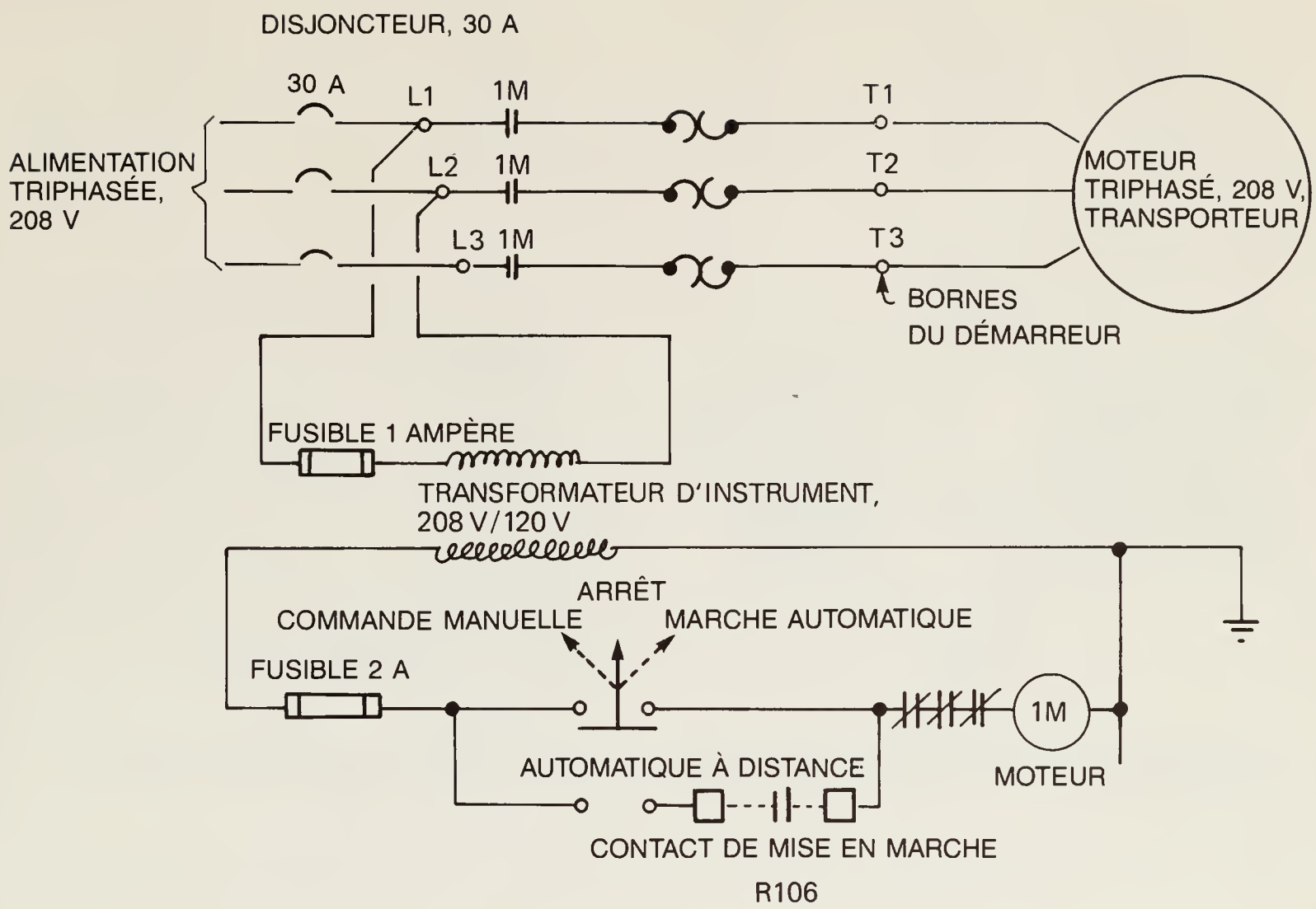



**Fig. 14. Schéma de principe du démarreur**

Le contrôle et la régulation de la température sont d'autres applications possibles du schéma de boucle.

8.5 *Boucle de régulation de température* Le schéma mécanique et le schéma de boucle, des figures 15 et 16 respectivement, illustrent la régulation de la température de l'air dans une installation de ventilation. La régulation de la température se fait en mélangeant de l'air extérieur et de l'air recyclé. Le dispositif de régulation de température et l'actionneur de registre sont les dispositifs électromécaniques de régulation à action progressive. Un potentiomètre permet de régler l'apport minimal d'air extérieur.

8.6 *Système de contrôle de température intérieure d'un silo* Ce système (fig. 17 et 18) contrôle la température interne des silos et sonne une alarme si la température et le taux d'augmentation de la température dans les silos sont trop élevés. Les capteurs de température sont raccordés à un processeur programmable par l'intermédiaire d'un conditionneur de signal résistance-courant. Le processeur programmable choisit automatiquement un capteur de température en alimentant un relais qui relie ce capteur au conditionneur de signal. Le programme de commande contrôle tous les capteurs à tour de rôle et détermine s'il doit sonner l'alarme pour chaque silo.

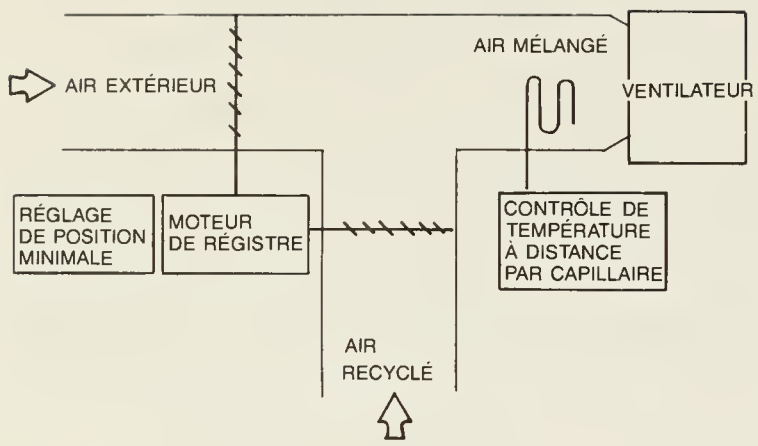



**Fig. 15. Agencement des organes mécaniques de la soufflerie**

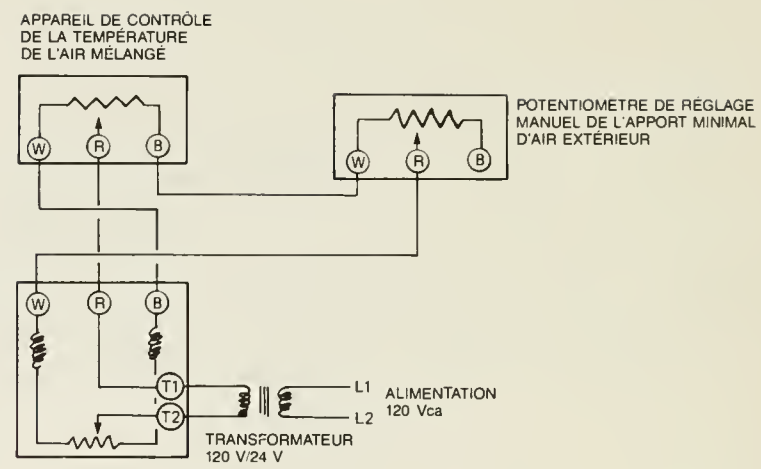



**Fig. 16. Schéma de boucle de la soufflerie**

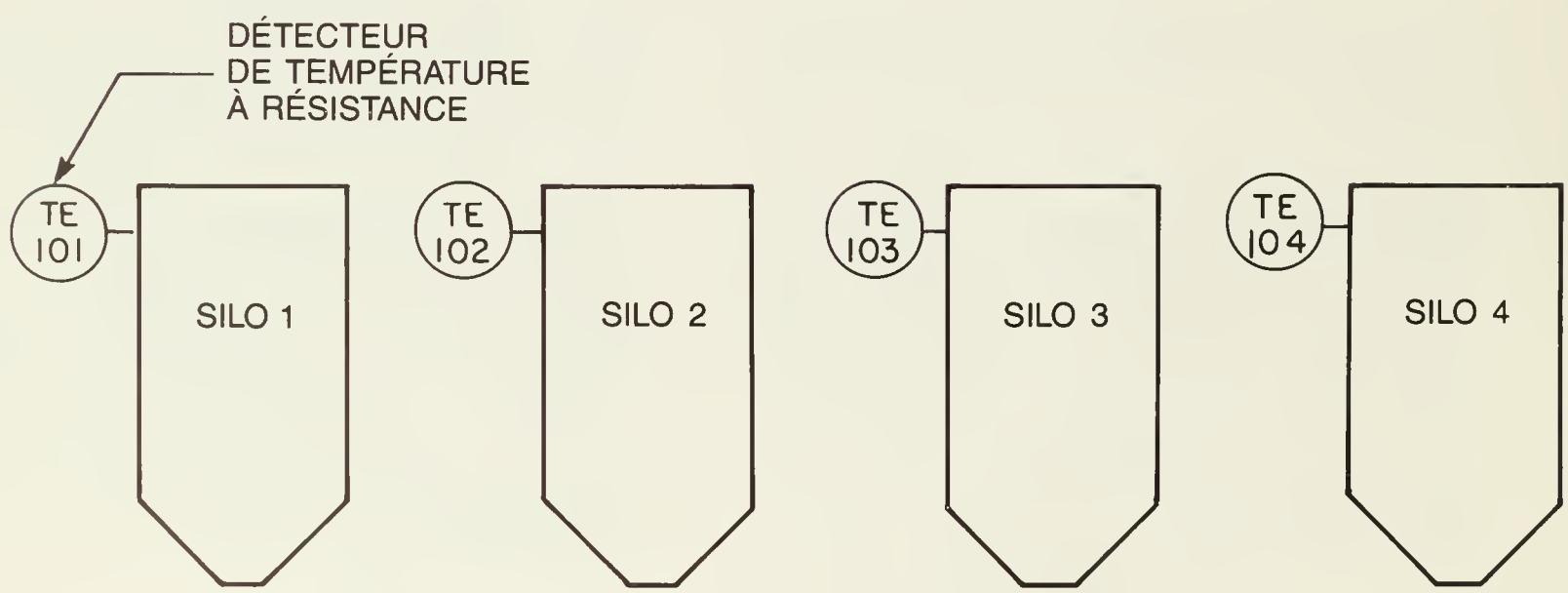
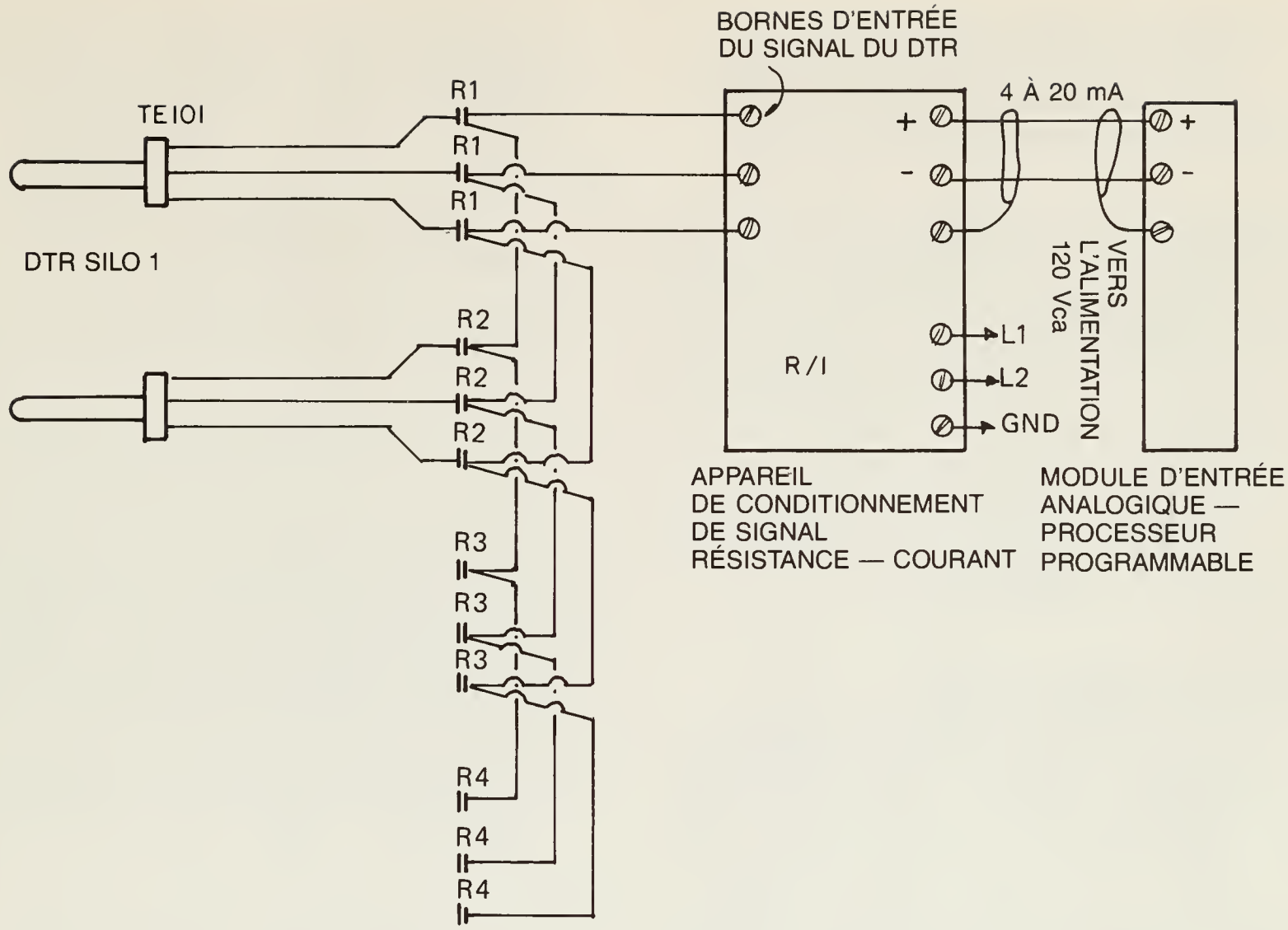



**Fig. 17. Agencement des organes mécaniques des silos dans un système de contrôle de la température des silos**



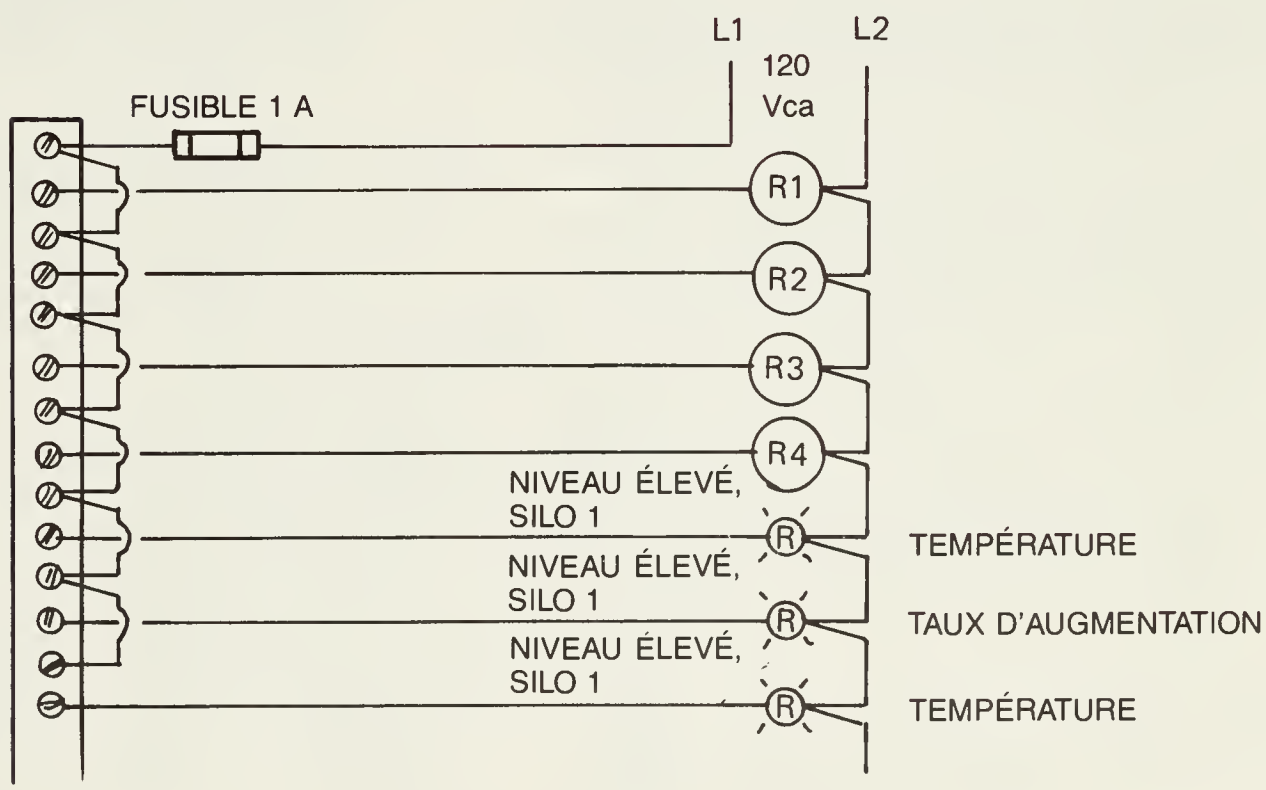




**Fig. 18. Schéma de boucle du système de surveillance de température des silos**

# 9 EXEMPLE DE PROBLÈME : CENTRE DE STOCKAGE ET DE PRÉPARATION D'ALIMENTS POUR LES ANIMAUX

Cet exemple de conception d'un centre de stockage et de préparation d'aliments pour animaux de la ferme démontre les divers principes étudiés dans le présent guide. L'exemple ne donne pas un projet terminé, mais illustre plutôt les divers mécanismes et procédés de conception qu'entraîne la conception d'un système de régulation. L'exemple fournit en outre les relations qu'il doit y avoir entre les concepteurs de procédés, les concepteurs de systèmes de régulation et les utilisateurs du système afin d'en arriver à produire un système utile.

## 9.1 Description du procédé

Cette installation comprend quatre silos primaires, numérotés de 1 à 4. Chaque silo est doté d'un capteur de température et d'un ventilateur d'aération. Un transporteur à vis, monté au sommet des silos, permet de les remplir. Les silos se déchargent par un transporteur central dans un transporteur de récupération qui se décharge à son tour dans un élévateur à godets. Ceci forme le premier montant d'élévateur du procédé.

Le premier montant se décharge dans un distributeur qui achemine les grains vers les quatre silos, vers le transporteur de remplissage, vers l'aire de chargement des camions, vers les bacs à ingrédients (numérotés de 10 à 14), vers un silo d'entreposage sous atmosphère humide contrôlée ou vers un séchoir continu. Des capteurs indiquent le niveau des grains qui s'accumulent dans les bacs à ingrédients et des obturateurs électriques coulissants en régularisent le déchargement.

Les bacs à ingrédients se déchargent dans un broyeur-mélangeur proportionnel. Le broyeur-mélangeur proportionnel se décharge, par l'intermédiaire d'un transporteur pneumatique, dans des silos d'entreposage de produit fini, numérotés de 20 à 28. Ces derniers silos sont aussi dotés de capteurs de niveau maximum.

Les silos contenant les produits humides se déchargent, par l'intermédiaire d'un transporteur à vis, dans un séchoir continu à grains. Le séchoir se décharge dans un second élévateur à godets (montant 2) qui, à son tour, se décharge dans le transporteur à vis vers les silos primaires ou ramène les grains vers le séchoir.

La figure 19 donne le schéma de principe de l'équipement nécessaire pour ce procédé, le tout s'articulant autour d'un processeur programmable.

## 9.2 Conception du système de régulation

Supposons ces objectifs et exigences :

- mise en marche automatique des ventilateurs d'aération des silos primaires, si la température dépasse un niveau donné (25 °C par exemple)

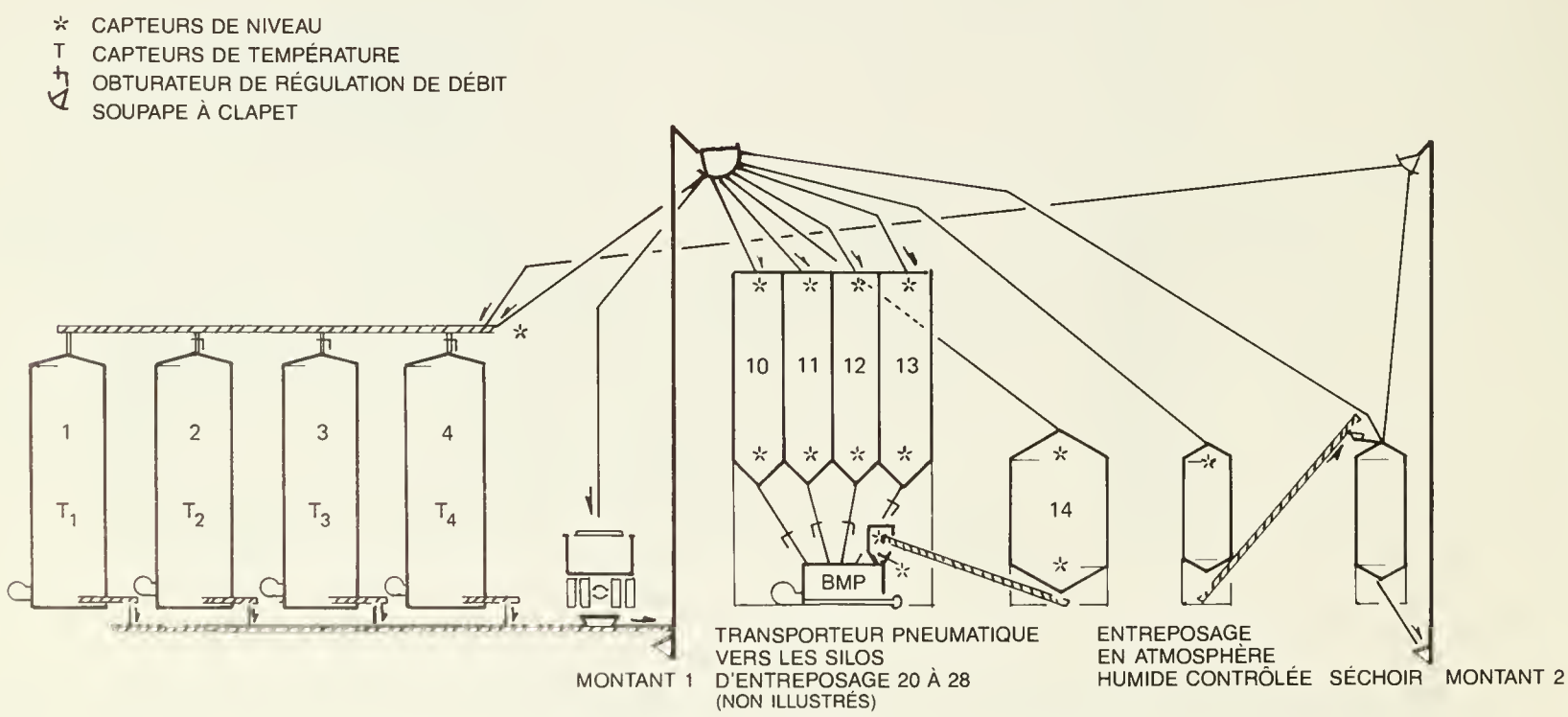



**Fig. 19. Schéma de principe de l'agencement de l'équipement pour le centre de stockage et de traitement d'aliments pour les animaux**

- arrêt automatique des ventilateurs et allumage de voyants d'état si la température dépasse un niveau maximal donné (40 °C, par exemple).
- suite à toute alarme, fermeture temporisée automatique du procédé à partir d'information des capteurs de niveau
- limitation de la charge électrique en laissant fonctionner, en même temps, au plus deux appareils des suivants : le séchoir, les élévateurs à godets et le broyeur-mélangeur proportionnel
- fonctionnement temporisé du broyeur-mélangeur proportionnel avant l'arrêt séquentiel automatique.

9.3 *Définition des besoins du système* Le schéma de principe illustrant l'agencement mécanique, appelé le schéma de procédé, est un élément essentiel de la définition des besoins du système. Sur le schéma du procédé, on indique tous les organes commandés et les principaux éléments du procédé touché par le système, par exemple les obturateurs, les moteurs, les électrovannes, les silos et les transporteurs. On utilise ce schéma pour décrire en détail le fonctionnement du système.

Le processus consistant à déterminer le mode de fonctionnement du système est répétitif et exige une étroite collaboration entre les concepteurs du procédé et des systèmes de régulation. Voici quelques exemples des points que les concepteurs devraient déterminer à cette étape de la conception :

- taille des silos
- puissance des moteurs
- limites relatives à la capacité de l'entrée électrique, c'est-à-dire quels sont les moteurs qui peuvent fonctionner en même temps?
- besoin de mesure continue des niveaux, par opposition aux contacts situés à des niveaux précis
- besoin de mesure continue de la température, c'est-à-dire une simple alarme à un niveau fixe donné de température suffit-il ou est-il nécessaire de disposer d'une alarme de taux d'augmentation de la température et de niveau maximal de température facilement réglable?
- conditions de milieu où le système de régulation principal doit fonctionner, c'est-à-dire la poussière, la propreté, la chaleur, les autres conditions
- besoins d'expansion future, c'est-à-dire sera-t-il nécessaire d'augmenter le nombre de silos, de vannes, d'obturateurs ou de moteurs?
- contraintes financières, c.-à-d. peut-on se permettre d'automatiser?
- conséquences de l'arrêt du système, c.-à-d. quelle doit être la résistance des éléments du système?
- précision et fidélité nécessaire dans la mesure des variables réglées comme la température des produits, le courant consommé par les moteurs, le poids des produits, la vitesse des courroies ou des transporteurs et le niveau du produit à l'intérieur des silos
- le fonctionnement doit-il se faire avec ou sans surveillance?
- le degré d'intervention de l'opérateur dans le système
- le contrôle des stocks doit-il être automatique ou manuel
- mesures à prendre à la suite d'une panne d'électricité; le système doit-il se remettre en marche automatiquement ou être remis en marche par l'opérateur?
- éléments dont la mesure est nécessaire : vitesse de l'élévateur à godets, courant consommé par les moteurs, position des obturateurs de silo, etc.
- limites admissibles des variables réglées comme la température absolue, le taux d'augmentation de la température, le courant des moteurs et la vitesse de l'élévateur.

À mesure que les entrées au système de contrôle sont connues, il faut les indiquer sur le schéma de procédé. Pour que ce dernier soit complet, il doit contenir les dispositifs de mesure ainsi que les appareils de commande. Dans certains domaines de transformation, les concepteurs étendent ces schémas de procédé de façon qu'ils montrent les interdépendances des divers appareils du système de régulation. Il s'agit alors du schéma de procédé et d'instruments. Cependant, il serait difficile de montrer tous ces détails dans le cas d'un centre de stockage et de traitement d'aliments pour les animaux, tant il y a de combinaisons de variables contrôlées. C'est pourquoi cet exemple ne montrera que les dispositifs eux-mêmes.

Même si l'on ne produit pas un schéma de procédé et d'instruments complet, on utilise quand même les conventions qui servent à l'établissement de ce genre de schémas. Des guides de l'Instrumentation Society of America donnent en détail les symboles et méthodes de numérotation utilisés pour établir les schémas de procédés et d'instruments.

À cette étape de la conception, il est presque impossible de communiquer par écrit les nuances de fonctionnement du système sans déployer des efforts considérables. Les communications verbales constituent le meilleur moyen pour faire connaître à l'utilisateur la portée du projet. Les voies de communication doivent rester ouvertes.

9.4 *Lien utilisateur – machine* L'utilisateur a une importance capitale pour le bon fonctionnement de toute installation automatique. Au cours de l'étape de la conception, il faut déterminer les préférences de l'utilisateur sur les points suivants :

- contrôle centralisé ou non de l'installation
- commandes traditionnelles (voyants et boutons) ou micro-ordinateur
- degré de perfectionnement, c.-à-d. une installation perfectionnée s'adapte facilement au micro-ordinateur et profite de la plus grande flexibilité
- méthode à utiliser pour régler les points de repère; si l'opérateur utilise un processeur programmable, ces points peuvent être réglés avec une console de programmation.

Afin de faciliter la conception du lien utilisateur – machine, il est bon d'en parler avec les opérateurs de l'installation. Dans la mesure du possible, il faut les faire participer aux décisions de la conception.

9.5 *Description de la suite des opérations de régulation* Plusieurs méthodes permettent d'identifier toutes les opérations du processus de régulation, mais la plus efficace prend la forme d'une feuille de calcul.

Sur une feuille de calcul, chaque suite d'opérations d'un sous-système est illustrée comme une série d'étapes coiffant un certain nombre de colonnes. Chacun des points contrôlés, avec le temps qui s'écoule entre une opération et la suivante, figure dans la colonne appropriée. Si un sous-système intervient à l'intérieur de la suite des opérations d'un autre sous-système (ex. l'aspiration de la poussière), il faut faire figurer le sous-système dans la colonne appropriée tout comme on le ferait pour un dispositif commandé.

De plus, il faut faire figurer les opérations de mise en marche et d'arrêt avec l'étape où ces opérations se retrouveraient s'il arrivait un fonctionnement anormal.

Dans le problème qui nous occupe—le centre de stockage et de traitement d'aliments pour les animaux—le transport du produit doit être arrêté graduellement si le contact de niveau maximum est actionné dans l'un des silos. Le transporteur de déchargement dans les silos primaires doit s'arrêter en premier. Le transporteur de récupération s'arrête ensuite après un court moment qui lui permet de se vider. Après un autre court temps, c'est au tour de l'élévateur à godets de s'arrêter.

Si une goulotte du distributeur vient à se boucher, l'arrêt se fait autrement. Dans ce cas, il n'y a pas de temps alloué pour laisser les divers transporteurs se vider. Tous les éléments commandés doivent donc s'arrêter simultanément. Une feuille de calcul peut facilement illustrer la suite des ces événements.

Plus qu'une simple illustration, la feuille de calcul permet au concepteur du système d'indiquer au concepteur du procédé les exigences du système. Une fois la conception du système terminée, la feuille de calcul servira en outre de guide d'exploitation afin de montrer à l'opérateur comment se déroulent les diverses opérations de régulation.

À mesure que la feuille de calcul prend forme, il faut étudier les aspects suivants de la conception :

- Dans quel ordre chaque élément doit-il être mis en marche et arrêté tant en situation normale qu'en situation anormale?
- Combien de temps doit s'écouler entre les étapes?
- Quelles sont les mesures à prendre après une panne d'électricité?
- Quels doivent être les réglages des divers capteurs? Par exemple, à quelle température les ventilateurs d'aération doivent-ils être mis en marche?
- Quelles sont les plages de consommation de courant des moteurs?
- Quelle est la plage de fonctionnement des transmetteurs analogiques? Si, par exemple, un transmetteur de 4 à 20 mA est utilisé, à quelle température correspond le courant de 4 mA?

Quand l'une de ces questions trouve une réponse, l'information doit être inscrite sur le schéma de procédé et d'instruments. Une fois terminée cette étape de la conception, le concepteur du système de régulation devrait disposer de toute l'information qu'il lui faut pour terminer la conception proprement dite.

9.6 *Ordinogramme* Si le concepteur dresse une feuille de calcul, il est probable que l'ordinogramme ne sera pas nécessaire pour l'ensemble du procédé. Cependant, certaines suites d'opérations de sous-systèmes particulièrement complexes peuvent justifier le recours à l'ordinogramme. En outre, le personnel de maintenance peu habitué aux grands systèmes de régulation peut avoir besoin des détails figurant sur un ordinogramme pour comprendre le système.

Toute l'information nécessaire à la conception du système devrait maintenant être en place.

9.7 *Choix des éléments* Le concepteur du système de régulation, travaillant de concert avec le concepteur du matériel mécanique, choisit alors les appareils du système de régulation. Il faut veiller à ce que chaque appareil fonctionne de la façon prévue. Deux exemples. Si le système a été conçu de façon que le contact de fin de course de l'obturateur de silo indique que ce dernier est ouvert, le contact ne doit pas être actionné tant que l'obturateur n'est pas entièrement ouvert. S'il est important de savoir qu'un obturateur est fermé ou ouvert, il vaut mieux prévoir deux contacts.

Il arrive souvent que des appareils mécaniques soient dotés de leurs propres capteurs et dispositifs commandés; ce peut être le cas d'électrovannes. Il faut alors indiquer clairement le fonctionnement exact de ce matériel auxiliaire. On peut se heurter à bon nombre de problèmes en essayant d'intégrer des appareils fournis par des fabricants différents. On doit, si possible, préciser le nom du fabricant de l'appareil prévu dans le système. Il est parfois préférable de moderniser un appareil de régulation compatible plutôt que d'utiliser des appareils fournis par divers fabricants.

C'est aussi à cette étape de la conception qu'il faut déterminer le type de système de régulation à utiliser. Le centre de stockage et de traitement d'aliments pour les animaux dont il est question dans l'exemple se prête bien à l'utilisation d'un processeur programmable. On dresse alors la liste de tous les signaux d'entrée et de sortie du processeur programmable afin de déterminer la mémoire qu'exige l'application. Après avoir prévu d'éventuels ajouts, on choisit le processeur approprié.

## 9.8 Schéma de principe

Si le système comprend des appareils électromécaniques ordinaires, on dresse un schéma de principe. Ce schéma fournit l'information qui sera utile pour déterminer les dimensions du panneau de commande et de la salle de commande. On trace aussi à ce moment le schéma de boucle analogique.

Dans le cas des systèmes de régulation basés sur des processeurs programmables, il ne faut que des schémas de boucle des entrées et des sorties à ce moment. Le logiciel peut être produit à tout autre moment, plus tard. En fait, il est souvent plus efficace de produire le logiciel après la construction du système. Il arrive fréquemment en cours de construction que l'on doivent modifier certains aspects des opérations. De plus, les programmeurs peuvent élaborer des logiciels de processeur programmable plus facilement si l'on a presque fini de déterminer les exigences du programme et du système.

On inscrit sur le schéma en échelle le plus possible de renvois croisés, de descriptions des diverses suites de commandes, des éléments de commande et de mesure ainsi que des appareils touchés. Bon nombre de logiciels spécialisés peuvent faciliter ce travail.

## 9.9 Conception du panneau de commande

On doit répondre aux questions suivantes au cours de la conception du panneau de commande :

- Quel genre de coffret faut-il? Est-ce que, par exemple, le panneau se trouve dans un endroit poussiéreux ou humide?
- Faut-il ventiler la salle à cause de la température élevée qui y règne?
- Le panneau de commande est-il assez grand pour d'éventuels ajouts?
- Les câbles et les conduits entreront-ils au haut ou au bas du coffret?
- L'espace suffit-il pour le raccordement des circuits extérieurs?
- Les composants internes du panneau sont-ils accessibles pour la maintenance?
- Les composants du système de régulation, comme les voyants et les boutons de commande, sont-ils bien identifiés? Le vocabulaire utilisé pour les étiquettes est-il approprié?
- Les éléments sont-ils agencés de façon logique? Les composants d'un même sous-système sont-ils groupés?
- Si le lien opérateur–système est assuré par un micro-ordinateur, le système comprend-il des mécanismes de commande manuelle en cas de panne d'ordinateur?

## 9.10 Conclusion

La conception d'un système de régulation, même pour un simple centre de stockage et de traitement d'aliments pour les animaux, exige que l'on réussisse à intégrer des appareils de mesure et de commande à des équipements mécaniques tout en tenant compte de l'opérateur humain. Ce guide fait valoir l'importance d'intégrer entièrement la conception et illustre les avantages que l'on peut tirer d'un système conçu de cette manière.

# BIBLIOGRAPHIE


*Code canadien de l'électricité—Première partie* 14e édition. 1982. Rexdale (Ont.) : Association canadienne de normalisation.

Canon, D.L. *Understanding electronic control of automation systems.* 1st ed. Dallas TX : Texas Instruments Inc.

*Electronic Control Instruments.* Technical Information and Application Bulletin 53E 9009. Fisher and Porter Company.

Haines, R.W. *Techniques de régulation en génie climatique : Chauffage, ventilation, conditionnement d'air.* Toronto (Ont.) : Van Nostrand Reinhold Company Ltd.

*Industrial Control.* Catalog No. 30. Allen-Bradley Ltd.

*Instrument loop diagrams.* Instrument Society of Canada Standard. Instrument Society of Canada.

Mitchel, B.W. *Instrumentation and measurement for environmental sciences.* 2nd ed. Special Publication 13-8. American Society of Agricultural Engineers.

*Modulating controls service handbook.* Revision 5-74JA. Tradeline, Honeywell Controls.

Patrick, D.R.; Farde, S.W. *Industrial process control systems.* 1st ed. Indianapolis, IN: H.W. Sams.

*Process instrumentation and control systems manual of practice, operations and maintenance OM-6.* 1984. Water Pollution Control Federation.

*Normes de sécurité relatives aux installations électriques.* Rexdale (Ont.) : Association canadienne de normalisation. C22.1-1982.

LIBRARY/BIBLIOTHEQUE
AGRICULTURE CANADA OTTAWA K1A 0C5
3 9073 00072209 2