

Électronique appliquée

**Georges Asch
et collaborateurs**

Acquisition de données

Du capteur à l'ordinateur

**Préface de Louis Néel,
prix Nobel de physique**

3^e édition



DUNOD

Tout le catalogue sur
www.dunod.com



Ce pictogramme mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du **photo-copillage**.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les

établissements d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la

possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.

Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie (**CFC**, 20 rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



Illustrations intérieures : Alain et Ursula BOUTEVEILLE-SANDERS
© Dunod, Paris, 2003, 2011
ISBN 978-2-10-056469-9

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (Art L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. • Seules sont autorisées (Art L 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

P RÉFACE

C'est avec beaucoup de plaisir que je présente cet ouvrage, car il traite avec compétence de l'évolution d'un sujet qui, depuis quelques siècles, est à la base de l'activité des physiciens et des ingénieurs : celui de la mesure. Mais depuis quelques décennies, les progrès foudroyants de l'électronique et de l'informatique lui ont donné un nouveau visage.

Il y a soixante-dix ans, jeune chercheur, j'avais à mesurer à quelques centièmes de degré près, des températures au voisinage de 400 °C, pour étayer mes conceptions sur le rôle des fluctuations du champ moléculaire des ferromagnétiques aux environs du point de Curie. Nos crédits étaient limités, le commerce ne fournissait que de rares appareils et nous devions construire, à l'atelier de notre laboratoire, les appareils nécessaires tels que potentiomètres, galvanomètres... Mais nous bénéficions de beaucoup de temps et d'un grand calme dans un bâtiment solide, isolé dans un parc. Il fallait une semaine pour tracer une courbe de chaleur spécifique en fonction de la température.

Aujourd'hui, tout a changé. Pour une même précision, les appareillages sont des centaines de fois plus légers et les processus de mesure des centaines de fois plus courts. En revanche, on opère souvent dans un milieu industriel, à l'environnement agressif, où de multiples perturbations, électromagnétiques, thermiques ou mécaniques (vibrations)... agissent particulièrement sur l'électronique omniprésente associée aux capteurs. On peut aussi multiplier le nombre des points de mesure et, finalement, grâce aux progrès de l'informatique qui traite immédiatement les données acquises, agir directement en temps réel, sans intervention humaine, sur le fonctionnement des dispositifs les plus divers comme l'activité d'un robot ou la trajectoire optimale d'un missile.

Ce sont les moyens de cette révolution que retracent les ouvrages du Professeur Asch et de ses collègues dont le traité fondamental *Les capteurs en instrumentation industrielle* est aujourd'hui complété par *Acquisition de données*.

Certes, il s'adresse naturellement aux ingénieurs et aux techniciens, de préférence quelque peu familiarisés avec la question : il leur rendra de grands services. Mais

je suis aussi persuadé qu'il sera utile aux chercheurs des laboratoires universitaires ainsi qu'aux étudiants scientifiques pour les aider à devenir de bons expérimentateurs, en attirant leur attention sur les effets parasites susceptibles d'affecter leurs mesures et auxquels souvent ils n'apportent qu'une attention insuffisante.

Je souhaite une belle carrière à ce traité.

Professeur Louis Néel, Prix Nobel.

TABLE DES MATIÈRES

Préface	V
Introduction	1
1 La chaîne d'acquisition de données – Généralités <i>par G. Asch</i>	3
1.1 Rôle et constitution de la chaîne	3
1.2 Conditions imposées à la chaîne de mesure	5
2 Les parasites – Généralités <i>par G. Asch</i>	13
2.1 Sources de parasites	14
2.2 Divers mécanismes d'influence ou couplages	17
2.3 Spectres de fréquences	20
2.4 Mode commun et mode série	24
3 Perturbations par couplage galvanique <i>par G. Asch</i>	27
3.1 Parasites conduits – Filtrage des lignes	28
3.2 Surtensions parasites – Limiteurs d'amplitude	35
3.3 Masse des signaux – Problèmes. Solutions	37
3.4 Masses mécaniques – Réseau de terre	41
4 Perturbations par couplage magnétique <i>par G. Asch</i>	47
4.1 Phénomènes d'influence magnétique	47
4.2 Parasites induits dans divers montages	50
4.3 Réduction des perturbations magnétiques à leur source	53
4.4 Protection d'un circuit par blindage	56

5 Perturbations par couplage électrique	61
<i>par G. Asch</i>	
5.1 Phénomènes d'influence électrique	61
5.2 Influence d'un couplage capacitif sur divers montages	62
5.3 Blindage électrostatique	66
5.4 Blindage des câbles	71
5.5 Transformateur à écran	75
6 Perturbations par couplage électromagnétique	77
<i>par G. Asch</i>	
6.1 Onde électromagnétique – Champ proche – Champ lointain	77
6.2 Influence d'une onde électromagnétique sur un circuit	78
6.3 Blindage électromagnétique – Efficacité de blindage	80
7 Caractéristiques métrologiques des dispositifs constitutifs de la chaîne	93
<i>par G. Asch</i>	
7.1 Incertitude apportée par un dispositif	93
7.2 Caractéristiques statiques	94
7.3 Caractéristiques dynamiques	97
7.4 Estimation de l'incertitude de mesure due à un dispositif	100
8 Les capteurs	103
<i>par G. Asch</i>	
8.1 Définitions	103
8.2 Capteurs générateurs de force électromotrice	104
8.3 Capteurs générateurs de courant	106
8.4 Capteurs générateurs de charge	107
8.5 Capteurs résistifs	109
8.6 Capteurs inductifs	112
8.7 Capteurs capacitifs	113
8.8 Capteurs pour milieux fortement perturbés	115
8.9 Choix d'un capteur	117
9 Les conditionneurs	119
<i>par G. Asch</i>	
9.1 Conditionneur du capteur source de courant	119
9.2 Conditionneur du capteur source de charge	121
9.3 Conditionneurs de capteurs résistifs	123
9.4 Conditionneurs de capteurs réactifs	129
10 Les amplificateurs	137
<i>par G. Asch</i>	
10.1 Référence de la tension du signal	137
10.2 Amplificateurs différentiels	141

10.3 Décalage statique	156
10.4 Caractéristiques dynamiques	167
10.5 Calcul d'incertitude	174
11 La protection des circuits d'entrée vis-à-vis des parasites <i>par G. Asch</i>	181
11.1 Problèmes instrumentaux et solutions possibles	181
11.2 Source isolée de la masse locale – Instrumentation référencée au réseau équipotentiel de terre	184
11.3 Source référencée à sa masse locale – Instrumentation isolée du réseau équipotentiel de terre	191
11.4 Source et instrumentation référencées à des masses distinctes	194
12 Le bruit de fond <i>par G. Asch</i>	201
12.1 Caractérisation du bruit de fond	201
12.2 Divers types de bruits	203
12.3 Calcul des tensions et courants de bruit	205
12.4 Schémas équivalents pour le bruit	210
12.5 Montages à faible bruit de fond	220
13 Les filtres <i>par G. Asch</i>	225
13.1 Types de filtres	225
13.2 Conditions imposées et paramètres du filtre	231
13.3 Relation entre ordre du filtre, précision et fréquence d'échantillonnage	234
14 Le multiplexeur <i>par G. Asch</i>	237
14.1 Généralités	237
14.2 Chaîne de mesure et le choix d'un multiplexeur	238
14.3 Caractéristiques instrumentales d'un multiplexeur	240
14.4 Supermultiplexage	248
14.5 Bilan des incertitudes	249
15 L'échantillonneur-bloqueur <i>par G. Asch</i>	251
15.1 Nécessité de l'échantillonneur-bloqueur	251
15.2 Constitution – Structures	252
15.3 Temps caractéristiques de l'échantillonneur-bloqueur	254
15.4 Dérives et décalages de la tension mémorisée	257
15.5 Bilan des incertitudes	259
16 Les convertisseurs analogique-numérique <i>par G. Asch</i>	261
16.1 Caractéristiques générales	261

16.2	Bruit de quantification – Rapport signal sur bruit	263
16.3	Principales méthodes de conversion	264
16.4	Convertisseurs bipolaires	281
16.5	Caractéristiques instrumentales	283
16.6	Mode d'emploi du CAN	287
16.7	Convertisseur numérique-analogique	289
17	L'organisation de la chaîne d'acquisition	293
	<i>par G. Asch</i>	
17.1	Structures de la chaîne d'acquisition	293
17.2	Gain de la chaîne	297
17.3	Résolution de la chaîne	301
17.4	Budget des temps	303
17.5	Budget des incertitudes – Précision de la chaîne	311
18	Le microprocesseur	315
	<i>par E. Chamberod et J.-P. Comte</i>	
18.1	Système à microprocesseur	315
18.2	Structure générale d'un microprocesseur	317
18.3	Accélération du traitement des microinstructions	320
18.4	Connexion des circuits externes au microprocesseur	325
18.5	Les différents types de microprocesseurs	336
19	Gestion matérielle de la chaîne par microprocesseur	341
	<i>par E. Chamberod et J.-P. Comte</i>	
19.1	Contrôle de la fréquence d'échantillonnage	341
19.2	Réglage du filtre antirepliement	343
19.3	Commande du multiplexage et de l'échantillonnage-blocage	346
19.4	Conversion analogique-numérique	349
20	Algorithmes d'acquisition et gestion des temps	361
	<i>par E. Chamberod et J.-P. Comte</i>	
20.1	Pilotage de la chaîne d'acquisition	361
20.2	Gestion du microprocesseur	367
20.3	Gestion de la mémoire	371
20.4	Programme d'acquisition complet	375
20.5	Mise en œuvre des algorithmes de traitement du signal	379
20.6	Organisation des routines d'acquisition et de calcul	380
21	Gestion métrologique de la chaîne	389
	<i>par G. Asch et P. Desgoutte</i>	
21.1	Chaîne comprenant un capteur linéaire	389
21.2	Chaîne comportant un capteur non linéaire	393

22	Transmission des données	
	<i>par G. Asch</i>	397
22.1	Transmission par boucle de courant	397
22.2	Transmissions numériques – Généralités	402
22.3	Transmission en parallèle	404
22.4	Transmission en série	407
22.5	Ligne de transmission	414
23	Capteurs intelligents. Réseaux	
	<i>par E. Chamberod et Z. Mammeri</i>	419
23.1	Le capteur intelligent	419
23.2	Réseaux	424
24	Réseaux de terrain	
	<i>par Z. Mammeri</i>	441
24.1	Réseaux locaux industriels (RLI)	441
24.2	Les réseaux de terrain	443
24.3	Réseau CAN	451
24.4	Réseau WorldFIP	457
24.5	Réseau PROFIBUS	462
25	L'ordinateur – Architecture matérielle et logicielle	
	<i>par J. Gunther</i>	469
25.1	Logiciel	471
25.2	Unité centrale	474
25.3	Interfaces de connexion des périphériques	481
25.4	Logiciel d'exploitation	487
26	L'acquisition de données sur PC	
	<i>par P. Renard</i>	495
26.1	Vue d'ensemble	495
26.2	Cartes d'acquisition	498
26.3	Cartes enfichables et formats de bus	502
26.4	Boîtiers externes	507
26.5	Options logicielles	510
26.6	Instruments virtuels	517
	Bibliographie	519
	Index	521

COLLABORATEURS

ÉRIC CHAMBEROD

Docteur de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, Éric Chamberod est Maître de conférences à l'IUT de Grenoble.

JEAN-PIERRE COMTE

Docteur en électronique, ancien Maître de conférences à l'Université Claude Bernard Lyon I.

PIERRE DESGOUTTE

Docteur en électronique, Pierre Desgoutte est Maître de conférences à l'Université Lyon I.

JEAN GUNTHER

Docteur en informatique, Jean Gunther est Maître de conférences à l'Université Lyon I.

ZOUBIR MAMMERI

Zoubir Mammeri est Professeur à l'Université Paul Sabatier de Toulouse.

PATRICK RENARD

Patrick Renard est le directeur de la communication de National Instruments France.

REMERCIEMENTS

La réalisation de cet ouvrage doit beaucoup à Madame Bernadette Chanut. Son aide constante et efficace a permis de mener ce travail à bonne fin.

NTRODUCTION

*« La science des projets consiste à prévenir
les difficultés de l'exécution. »*
Vauvenargues.

Pour agir efficacement sur un processus physique, chimique ou biologique, naturel ou industriel, il importe, au préalable, de bien le connaître : la chaîne d'acquisition fournit au décideur (homme ou machine) les informations permettant d'orienter son action et de valider ses décisions. Encore faut-il que les informations acquises soient suffisantes et dignes de foi.

D'un monde réel complexe où s'enchevêtrent de multiples phénomènes, la chaîne d'acquisition permet d'extraire les informations simples et nécessaires à une représentation valable et utile. Ces informations caractérisent les grandeurs physiques qui sont les paramètres agissants des modèles représentatifs de la réalité : température, pression, débit, force, etc. Connaître une grandeur, c'est, pour le physicien ou l'ingénieur, lui affecter une valeur numérique ou une succession de valeurs numériques significatives qui résultent d'opérations de mesure : la chaîne d'acquisition est donc une chaîne de mesure. La grandeur objet de mesure ou mesurande est caractérisée par son intensité et par son évolution temporelle ; ce sont ces informations que pour chaque mesurande la chaîne d'acquisition doit pouvoir délivrer sous la forme de signaux électriques représentatifs et exploitables.

Les difficultés que présente l'acquisition de données ont deux causes principales :

- l'imbrication dans la réalité de multiples grandeurs qui rend souvent difficile l'isolement et la saisie du seul mesurande recherché ;
- les imperfections des dispositifs constitutifs de la chaîne qui entraînent une détérioration des signaux et donc de l'information.

C'est à ces deux niveaux que doit se porter l'attention du concepteur pour limiter l'imprécision des mesures et éviter les risques d'erreur.

Le capteur est la source première du signal électrique et donc de l'information traitée; le signal qu'il délivre doit être l'image électrique du mesurande qu'il traduit et donc contenir toute l'information recherchée. Or, du seul fait de son installation, un capteur est susceptible de modifier la valeur du mesurande qu'il est censé traduire et, de plus, les autres grandeurs physiques de son environnement risquent d'altérer sa réponse.

Les dispositifs dont l'association au capteur constitue la chaîne d'acquisition (amplificateur, filtre, échantillonneur-bloqueur, convertisseur analogique-numérique) ont pour fonction de traiter le signal de façon à le rendre approprié à l'exploitation prévue. Cependant, les caractéristiques métrologiques de ces dispositifs ont des limitations dont il faut tenir compte pour éviter une détérioration du signal et donc une perte d'information : dérives thermiques et temporelles, bruit de fond, sensibilité aux perturbations électromagnétiques, non linéarité, bande passante limitée ou temps de réponse fini. Concevoir une chaîne d'acquisition, c'est choisir les dispositifs et leur montage de façon que leurs limitations soient compatibles avec la sauvegarde de l'information liée au signal.

La généralisation du rôle des ordinateurs dans le contrôle-commande des processus industriels et en particulier, leur association aux chaînes d'acquisition n'a pas supprimé les problèmes précédents : elle donne, cependant, des moyens nouveaux, automatisés et rapides pour en tenir compte et les corriger, déchargeant ainsi l'opérateur des tâches fastidieuses de réglage, de compensation, d'annulation, etc. En outre, l'ordinateur est capable de remplir, en aval de la chaîne, les fonctions complémentaires à l'acquisition que sont la mémorisation, l'affichage des données, leur analyse et leur traitement en temps réel.

Le but de cet ouvrage est d'attirer l'attention sur les problèmes que pose l'adéquation à leur tâche des divers dispositifs de la chaîne et d'examiner les solutions possibles. Il n'y a pas, en général, de solution parfaite car les contraintes techniques, environnementales, économiques imposent des compromis.

C'est dans l'espoir d'aider le concepteur et l'utilisateur de chaînes d'acquisition à faire des choix raisonnables et efficaces que nous avons écrit cet ouvrage.

LA CHAÎNE D'ACQUISITION DE DONNÉES – GÉNÉRALITÉS

1.1 Rôle et constitution de la chaîne

Une chaîne d'acquisition recueille les informations nécessaires à la connaissance et au contrôle d'un procédé ; elle délivre ces informations sous une forme appropriée à leur exploitation (*figure 1.1*).

Un procédé industriel regroupe divers éléments dont les interactions physiques ou (et) chimiques concourent à un but de fabrication ou de transformation ; le procédé est instrumenté et piloté à cette fin. L'état d'un procédé est, à chaque instant, caractérisé par les valeurs d'un certain nombre de grandeurs physiques ou (et) chimiques variables : ces valeurs sont les informations que le système d'acquisition doit fournir. L'assignation d'une valeur à une grandeur physique ou chimique est une opération de mesure, la grandeur objet de la mesure étant appelée le **mesurande**.

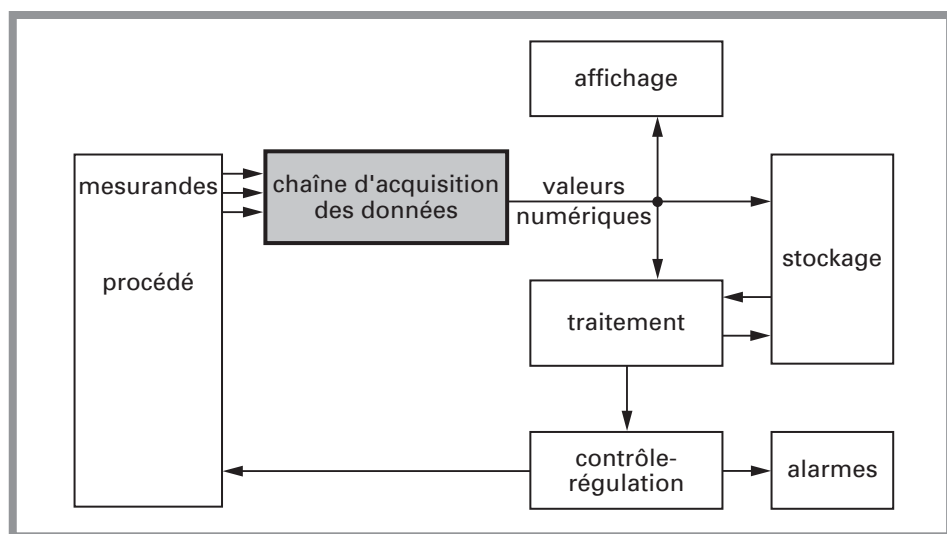


Figure 1.1 - Place de la chaîne d'acquisition de données dans un ensemble de mesure-contrôle de procédé.

L'analyse, pour ses grandeurs fondamentales, de l'ensemble complexe d'interactions que constitue un procédé s'obtient par une succession d'opérations instrumentales ayant chacune sa fonction propre : la chaîne d'acquisition est formée par l'ensemble ordonné et coordonné des divers dispositifs assurant ces fonctions (*figure 1.2*).

Dans sa structure de base, une chaîne d'acquisition doit pouvoir assurer, au moyen des dispositifs appropriés, les fonctions suivantes :

- **extraction de l'information** concernant chacune des grandeurs physiques à connaître et **traduction en signal électrique** au moyen de capteurs et conditionneurs;
- **traitement analogique du signal** destiné en particulier à en éviter la dégradation par le bruit et les parasites : amplification, filtrage ;
- **sélection** parmi l'ensemble des signaux disponibles du seul signal requis à l'aide du multiplexeur ;
- **conversion du signal sous forme numérique** adaptée au calculateur chargé de l'exploiter, au moyen de l'échantillonneur-bloqueur et du convertisseur analogique numérique ;
- **la coordination des opérations** précédentes est assurée par un calculateur qui, en outre, peut être chargé de divers traitements sur les signaux numériques qu'il a acquis, traitements destinés à faciliter leur exploitation (linéarisation) ou corriger des défauts de l'appareillage (dérives thermiques compensées après autozéro et autoétalonnage par exemple).

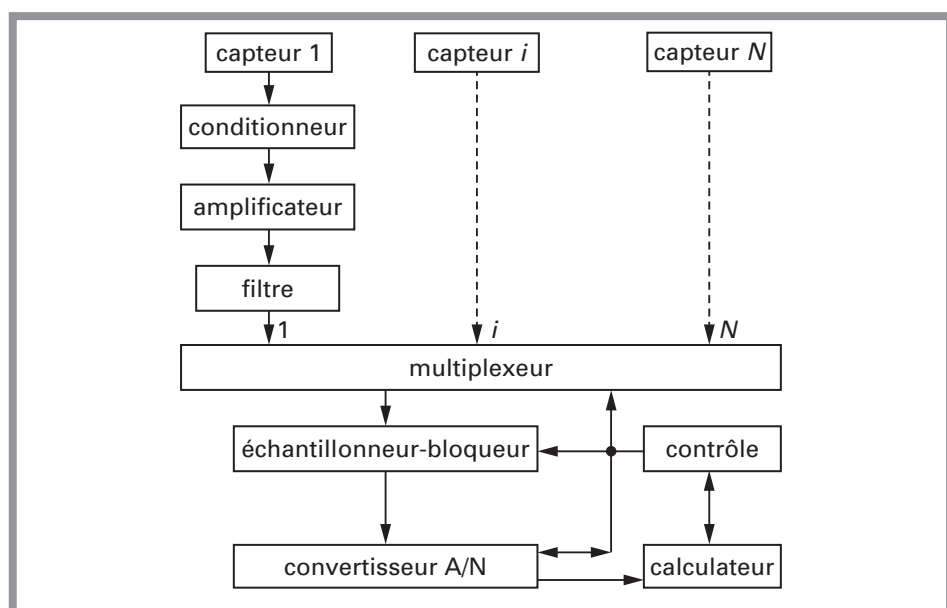


Figure 1.2 - Exemple de structure d'une chaîne d'acquisition.

Des conditions particulières d'emploi peuvent nécessiter l'adjonction de fonctions supplémentaires comme, par exemple : la **transmission à distance** des signaux par ligne bifilaire, après conversion tension-fréquence ou tension-courant, par émission hertziennne, en général à modulation de fréquence ou d'impulsions, ou encore par fibre optique après conversion du signal électrique en signal optique.

1.2 Conditions imposées à la chaîne de mesure

La conception d'une chaîne doit satisfaire à des conditions imposées par l'application envisagée, définies dans le cahier des charges, et qui concernent en particulier : l'étendue de mesure, la précision, la résolution, la rapidité, l'immunité aux grandeurs d'influence de l'environnement de mesure.

1.2.1 Étendue de mesure

L'étendue de mesure ($E.M.$) est définie par les valeurs maximale $m_{\max}$ et minimale $m_{\min}$ du mesurande à acquérir :

$$E.M. = m_{\max} - m_{\min}$$

Selon les valeurs de $m_{\min}$ on peut distinguer trois cas :

$$\bullet \quad m_{\min} = m_0, \quad E.M. = m_{\max} - m_0,$$

$$\text{Exemple :} \quad T_{\max} = 700 \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad T_{\min} = 500 \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad E.M. = 200 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

$$\bullet \quad m_{\min} = 0, \quad E.M. = m_{\max}$$

$$\text{Exemple :} \quad p_{\max} = 100 \text{ bar}, \quad p_{\min} = 0 \text{ bar}, \quad E.M. = 100 \text{ bar}.$$

$$\bullet \quad m_{\min} = -m_{\max}, \quad E.M. = 2m_{\max},$$

$$\text{Exemple :} \quad m_{\max} = 1 \text{ cm}, \quad m_{\min} = -1 \text{ cm}, \quad E.M. = 2 \text{ cm}.$$

La donnée de l' $E.M.$ est un des éléments déterminants du choix d'un capteur approprié.

1.2.2 Précision

L'exploitation convenable des résultats de mesure impose une limite maximale à l'incertitude de mesure, par exemple :

- connaître la valeur d'une température T à $\pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ou $\pm 0,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ près;
- connaître la valeur d'une force F à 1 % ou 0,1 % près.

L'incertitude qui affecte chaque résultat de mesure est une caractéristique importante de la chaîne d'acquisition. À l'exclusion des grandeurs étalons dont la valeur est fixée conventionnellement, la valeur vraie m d'une grandeur physique ne peut être déterminée exactement par la mesure.

Ce dont dispose l'expérimentateur, c'est d'une part un résultat numérique M délivré par l'installation de mesure et qui est la valeur mesurée, d'autre part une estimation de l'incertitude ou erreur à craindre, $\pm \delta M$, qui affecte le résultat de mesure. Ceci permet à l'expérimentateur de fixer la plage de valeurs à l'intérieur de laquelle se trouve – le cas échéant avec une probabilité déterminée – la valeur vraie m :

$$M - \delta M \leq m \leq M + \delta M$$

que l'on écrit généralement : $m = M \pm \delta M$.

L'**erreur de précision** de la chaîne est l'erreur relative ϵ_p rapportée à l'étendue de mesure :

$$\epsilon_p = \frac{\delta M}{M_{\max} - M_{\min}}.$$

La précision de la chaîne est d'autant plus grande que ϵ_p est plus petit.

La valeur de l'incertitude δM peut être estimée a priori à partir des caractéristiques métrologiques des divers dispositifs constitutifs de la chaîne telles qu'elles sont fournies par les constructeurs. Ce mode d'estimation de l'incertitude est le seul possible dans la phase de conception d'une chaîne de mesure dont l'incertitude maximale est imposée par le cahier des charges. L'analyse et le décompte de l'ensemble des incertitudes apportées par les divers éléments de la chaîne de mesure constitue le **budget des incertitudes** (§ 17.5).

Une valeur plus exacte de l'incertitude réelle peut être estimée a posteriori par **étalonnage** de la chaîne. Pour ce faire, on détermine la réponse de la chaîne à des ensembles de valeurs connues des divers mesurandes. La répartition statistique des résultats de mesure permet d'établir la réponse réelle de la chaîne ainsi que les incertitudes associées.

1.2.3 Résolution

Pour certains dispositifs (potentiomètre bobiné, convertisseur analogique-numérique), une faible variation de la grandeur d'entrée peut n'entraîner aucune variation mesurable de leur grandeur de sortie.

De même, la présence du bruit de fond (chapitre 12) rend la détection d'un signal d'autant plus difficile que le signal est plus faible.

Soit $dm_{\min}$ la variation minimale du mesurande donnant une variation mesurable $dM_{\min}$ de la valeur M mesurée :

- si $dm < dm_{\min}$, on peut avoir $dM = 0$;
- si $dm = dm_{\min}$, on a $dM = dM_{\min}$

Il en résulte sur la valeur mesurée une incertitude $\delta M = dM_{\min}$ qui, rapportée à l'étendue de mesure, est l'**erreur de mobilité** :

$$\epsilon_m = \frac{dM_{\min}}{M_{\max} - M_{\min}}.$$

On désigne par **résolution**, l'inverse de ϵ_m :

$$\text{résolution} = \frac{M_{\max} - M_{\min}}{dM_{\min}}.$$

La **résolution** spécifie le nombre de valeurs distinctes qu'il est possible d'associer au mesurande dans l'étendue de mesure.

1.2.4 Rapidité

Les valeurs numériques obtenues pour chacun des mesurandes doivent être assez nombreuses pour être représentatives de leur évolution temporelle.

La rapidité caractérise l'aptitude d'un dispositif à répondre aux variations temporelles du mesurande; la **rapidité est spécifiée soit par la bande passante, soit par le temps de réponse** (§ 7.3.2).

Le cahier des charges définit pour chaque mesurande l'extension du spectre de fréquences et en particulier la limite supérieure qui est la fréquence haute F_h . Les divers dispositifs de la chaîne doivent avoir des bandes passantes telles que le signal puisse être traité sans que son atténuation ou son déphasage ne deviennent incompatibles avec la précision exigée.

■ Échantillonnage

Le multiplexeur et l'échantillonneur-bloqueur réalisent un échantillonnage des signaux. En principe, afin d'éviter toute perte d'information, la fréquence F_e à laquelle s'effectue l'échantillonnage doit satisfaire à la **condition de Nyquist** :

$$F_e \geq 2 F_h.$$

L'opération d'échantillonnage entraîne l'apparition de nouvelles bandes de fréquences centrées autour de $F_e, 2F_e, \dots, kF_e$.

Soit $F_N = F_e/2$ la **fréquence dite de Nyquist**; on montre que, du fait de l'échantillonnage, un signal dont la fréquence F_1 est supérieure à F_N : $F_1 = F_N + \Delta F_1$

donnera naissance, après échantillonnage, entre autres, à un signal de fréquence $F'_1 = F_N - \Delta F_1$. Ce dernier signal est dit replié : dès lors que $F'_1 \leq F_h$, ce signal se superpose au signal de mesure et dégrade son information. Afin d'éviter ce risque, il est indispensable de filtrer le signal avant tout échantillonnage en sorte que les fréquences susceptibles d'être repliées dans le spectre du signal utile soient suffisamment atténuées pour que leur repliement n'altère pas de façon significative le spectre de ce signal (figure 1.3).

Les conditions de précision exigées de la chaîne imposent généralement, dans le cas d'un filtre réel, une fréquence d'échantillonnage F_e très supérieure au minimum théorique de Nyquist (§ 13.3).

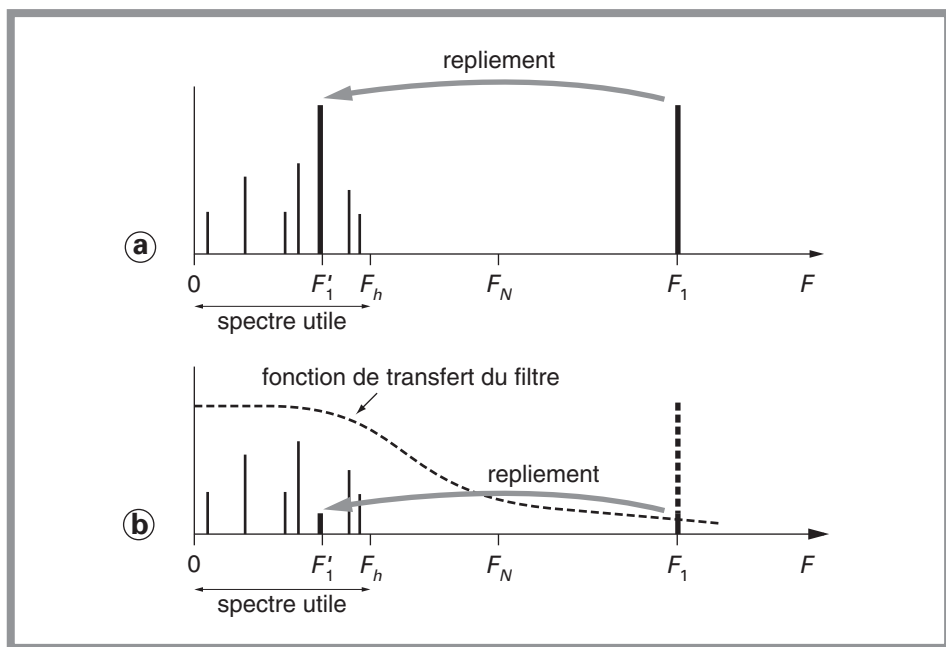


Figure 1.3 - Repliement d'un signal dans le spectre utile :
a) sans filtrage ; b) avec filtrage avant échantillonnage.

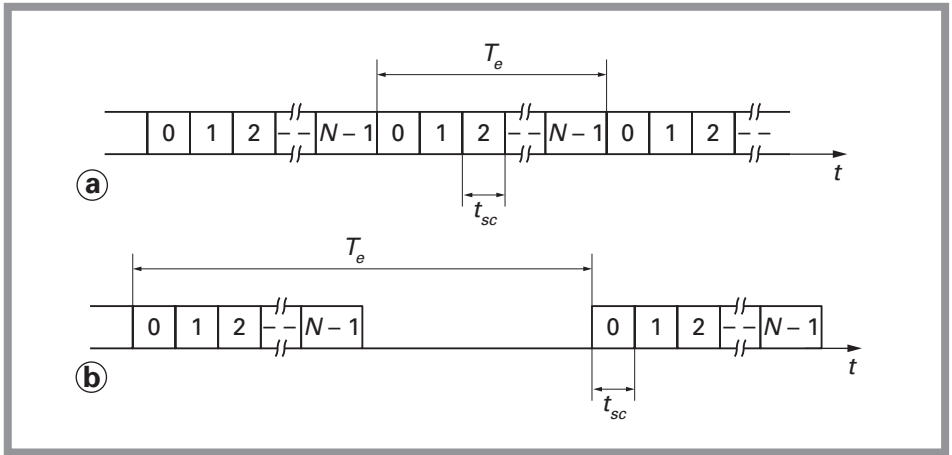
■ Temps de scrutation

Entre deux échantillonnages successifs d'une même voie, s'écoule une période d'échantillonnage $T_e = 1/F_e$. Pendant cet intervalle T_e , l'ensemble des N canaux doit être échantillonné et converti sous forme numérique. On désigne par t_{sc} , **temps de scrutation**, la durée nécessaire à l'acquisition complète d'une voie; on a donc :

$$N t_{sc} \leq T_e \quad \text{soit :} \quad t_{sc} \leq T_e / N. \quad (1)$$

On distingue généralement deux modes de scrutation :

- la scrutation séquentielle lorsque $t_{sc} = T_e/N$; dans ce cas la scrutation des voies s'effectue en permanence et sans temps mort entre les N scrutations de l'ensemble des voies (*figure 1.4a*) ;
- la scrutation en rafale lorsque $t_{sc} < T_e/N$; dans ce cas les N voies de mesure sont scrutées très rapidement afin d'obtenir des informations quasi synchrones sur leurs signaux ; il en résulte qu'entre les N scrutations de l'ensemble des voies il y a un temps mort de valeur : $T_e - N t_{sc}$ (*figure 1.4b*).



Le temps nécessaire à la scrutation d'une voie résulte de l'addition des temps de réponse des dispositifs constitutifs de cette voie. Chaque dispositif d'une chaîne est caractérisé, en effet, par un **temps de réponse** t_r qui est soit constant (temps de conversion d'un convertisseur analogique-numérique), soit fonction de la précision recherchée (temps d'établissement à ε près de l'amplificateur, de l'échantillonneur-bloqueur, etc.). La durée minimale de scrutation d'une voie doit donc être égale à la somme des temps de réponse des dispositifs intervenant :

$$\sum t_{r_i} \leq t_{sc}. \quad (2)$$

Il résulte des inéquations (1) et (2) que les divers dispositifs qui interviennent dans la scrutation d'une voie doivent avoir des réponses suffisamment rapides pour que soit satisfaite la condition :

$$\sum t_{r_i} \leq T_e/N.$$

L'application à la chaîne d'acquisition de cette dernière condition constitue le **budget des temps** (§ 17.4).

1.2.5 Environnement de mesure

L'environnement de mesure regroupe l'ensemble des grandeurs physiques ou chimiques – autres que le mesurande – dont l'influence sur les divers éléments de la chaîne est susceptible d'en modifier les performances, d'altérer le signal de mesure et donc d'entraîner un résultat de mesure erroné.

Parmi ces grandeurs dites d'influence, les plus généralement présentes sont la température et les parasites ou perturbations électromagnétiques mais, le cas échéant, vibrations, humidité, rayonnements nucléaires peuvent aussi être la cause d'une dégradation des conditions de mesure.

Lorsque la chaîne de mesure risque d'être soumise à des grandeurs d'influence, deux tactiques sont en général possibles :

- **minimiser leur influence par des protections adéquates** : supports antivibratoires, enceintes thermostatées, blindages antiparasites, etc.
- **prendre en compte leur influence, lorsque cela est possible, afin de corriger en conséquence le résultat de mesure.**

■ Influence de la température

Les variations de température sont susceptibles de modifier la sensibilité d'un capteur, le gain d'un amplificateur et de provoquer des décalages de leur zéro.

Cependant, la mesure de la température du capteur permet de connaître la sensibilité réelle de l'appareil dès lors qu'est connue la relation sensibilité-température et de corriger en conséquence les résultats de mesure.

De même les procédures d'auto-étalonnage et d'autozéro (§ 21.1) permettent, à chaque instant, de connaître respectivement le gain réel de la chaîne ainsi que son décalage de zéro qui, dès lors, peuvent être pris en compte dans l'exploitation des résultats de mesure.

■ Compatibilité électromagnétique

La compatibilité électromagnétique (CEM) est l'aptitude d'un dispositif électronique à fonctionner correctement :

- d'une part sans perturber les dispositifs voisins, (émission),
- d'autre part sans être perturbé par ces dispositifs, (immunité).

Les chaînes d'acquisition se trouvent généralement placées dans un environnement où de multiples appareils et machines électriques créent, par leur fonctionnement même, des champs électromagnétiques qui se propagent à partir de leurs sources par rayonnement dans l'espace ou par conduction le long des câbles. Ces champs, lorsqu'ils atteignent les circuits de la chaîne d'acquisition, sont suscepti-

bles d'y développer des perturbations ou des signaux parasites qui, en se superposant au signal utile, risquent de détériorer l'information que porte ce signal.

Il est donc primordial, lors de la réalisation d'une chaîne d'acquisition, d'en assurer la compatibilité électromagnétique et principalement l'immunité aux parasites des étages où le signal est à faible niveau. Il s'agit dès lors de concevoir circuits et montages de façon à assurer au mieux la protection du signal à l'égard des parasites, que ceux-ci aient pour origine des dispositifs extérieurs ou certaines parties du système dont la chaîne d'acquisition est l'un des éléments. L'étude des divers types de perturbations, de leurs effets et des moyens de protection est l'objet des chapitres 2 à 6.

LES PARASITES — GÉNÉRALITÉS

Les parasites sont des tensions ou des courants variables et indésirables qui sont superposés au signal utile, produit ou traité par un appareillage. Contrairement au bruit de fond qui est une caractéristique physique propre à tout circuit, les parasites sont transférés par le couplage intempestif d'un circuit qui est leur source vers le circuit qu'ils perturbent.

Les parasites sont susceptibles de dégrader l'information portée par le signal utile et de provoquer dans des circuits de contrôle des commandes inopportunes lorsque leur niveau dépasse un certain seuil. Cette situation risque de se produire principalement dans les circuits où les signaux utiles sont de faible amplitude. C'est le cas, en particulier, dans la partie initiale de la chaîne d'acquisition au niveau des capteurs, de leurs conditionneurs et des amplificateurs associés, tous dispositifs dont l'agencement, les caractéristiques métrologiques et électriques doivent prendre en compte la présence de parasites de divers types afin d'en minimiser les effets (chapitre 11).

L'importance des parasites apparaissant dans le circuit perturbé dépend :

- de la nature et de l'intensité des phénomènes électriques dont leur source est le siège;
- de l'influence que la source peut exercer sur le circuit;
- des caractéristiques électriques (impédance, bande passante) du circuit perturbé.

Les perturbations apportées par des parasites ne sont pas inévitables ; au contraire, un ensemble de méthodes permet au moins de les minimiser, au mieux de les supprimer en agissant suivant trois directions :

- action sur la source, lorsque cela est possible, pour supprimer ou limiter les phénomènes à l'origine des parasites ;
- action sur le couplage qui existe entre source et circuit afin d'annuler ou réduire l'influence perturbatrice ;
- action sur le circuit perturbé qui doit être conçu de façon à y minimiser la sensibilité du signal aux parasites.

2.1 Sources de parasites

Une source de parasites est un dispositif ou un appareillage électrique qui, en fonctionnement, produit dans son environnement un champ électrique et un champ magnétique variables. Ces champs se propagent à partir de leur source soit par rayonnement, soit guidés le long de conducteurs ; ils développent dans les circuits qui s'y trouvent soumis des courants et tensions qui sont parasites dès lors que leur présence n'est pas voulue.

L'importance des parasites prenant naissance dans un circuit est d'autant plus grande que les champs électriques et (ou) magnétiques qui sont à leur origine sont d'une part plus intenses et d'autre part, à variation plus rapide. C'est pourquoi on peut considérer comme **sources de parasites potentielles** :

- les **circuits de puissance** d'une part, qui sont le siège de tensions et (ou) courants variables importants ;
- les **circuits de commutation** d'autre part, où se produisent de brusques variations de courant et de tension.

Il va de soi qu'un même circuit peut être à la fois un circuit de puissance et un circuit de commutation aggravant d'autant les risques de parasitage.

Les circuits de puissance regroupent :

- les lignes de transport d'énergie ;
- les appareillages électriques tels que transformateurs, fours, éclairage, machines-outils, moteurs, générateurs, émetteurs de radiodiffusion (*figure 2.1*).

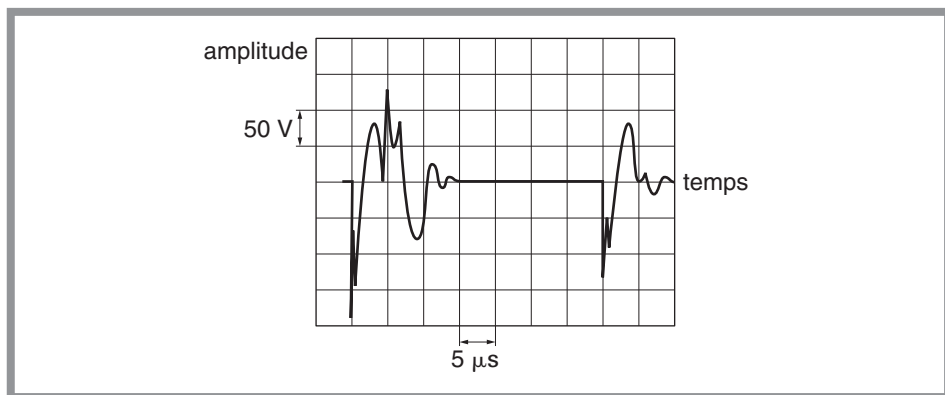


Figure 2.1 - Exemple de parasite produit par une machine-outil sur le réseau d'alimentation.

Les circuits de commutation sont caractérisés par des phases alternées de blocage et de conduction de certains de leurs composants : circuits numériques, oscilla-

teurs de relaxation, circuits à relais, alimentations à découpage, allumage automobile, flashes électroniques, etc.

Les sources de parasites précédemment indiquées sont localisées dans des appareillages industriels ou domestiques : il y a lieu de signaler, en outre, deux phénomènes naturels susceptibles d'engendrer des parasites : la décharge électrostatique et la foudre.

2.1.1 La décharge électrostatique

Elle est la conséquence de l'électrisation d'un corps par frottement, phénomène désigné comme effet triboélectrique : le frottement de deux isolants de constantes diélectriques différentes ou d'un isolant et d'un métal entraîne l'apparition, sur leurs surfaces respectives, de charges électriques de signes contraires. Les objets ou corps chargés électriquement créent dans leur voisinage un champ électrostatique proportionnel à la charge portée. Lorsque ce champ atteint sa valeur disruptive, il se produit une décharge rapide par un courant bref mais intense, créant dans l'espace environnant un champ magnétique important et variable qui est à l'origine des parasites induits dans les circuits qui s'y trouvent soumis. C'est ainsi que les frottements d'un liquide isolant sur la paroi interne d'une conduite, d'une courroie sur une poulie, du métal et du diélectrique d'un câble coaxial, d'une personne se déplaçant sur un tapis isolant, entraînent, par effet triboélectrique, l'apparition de charges puis, lorsque le champ disruptif est atteint, de décharges électrostatiques.

Dans les deux premiers exemples cités, le danger réside d'abord dans les risques d'explosion lorsque l'atmosphère où s'effectuent les décharges est explosible.

Dans le cas du câble coaxial, la séparation des charges portées par le diélectrique et le conducteur lors de mouvements de flexion ou de torsion du câble est une source de bruit dont le niveau peut atteindre jusqu'à 100 mV, mais que l'on peut prévenir soit en empêchant tout mouvement du câble, soit en utilisant un câble dit à faible bruit dont l'interface métal-diélectrique est revêtue d'un produit lubrifiant et conducteur facilitant l'écoulement des charges.

Une personne se déplaçant sur un sol recouvert de moquette peut acquérir une charge de l'ordre de 10^{-6} C; sa capacité par rapport à la terre étant de l'ordre de 10^{-10} F, son potentiel peut donc atteindre plusieurs kilovolts (*figure 2.2*). Le contact d'une personne à un tel potentiel avec un composant tel qu'un transistor à effet de champ entraîne la destruction immédiate de ce dernier par claquage de l'isolant entre gate et canal. Lorsqu'une personne chargée électrostatiquement s'approche d'une surface métallique reliée à la terre, une étincelle jaillit entre cette personne et la surface dès lors que le champ entre elles atteint la valeur disruptive ($30 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$ dans l'air).

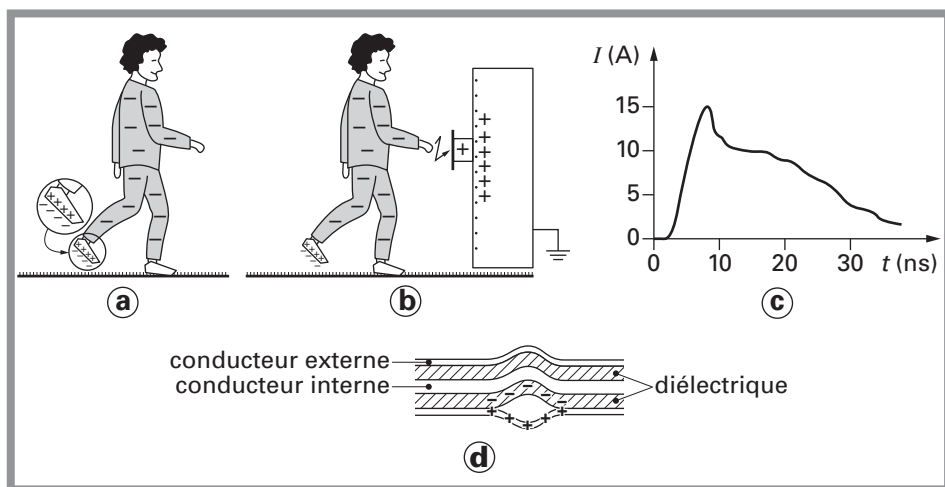


Figure 2.2 - Effet triboélectrique.

a) processus de charge d'une personne; b) décharge d'une personne et influence sur un équipement électronique; c) exemple de courant de décharge d'une personne; d) charges triboélectriques dans un câble coaxial.

Les moyens de protection mis en œuvre visent :

- à éviter la formation de charges électrostatiques par l'emploi de matériaux non triboélectriques (tapis en fibres naturelles);
- à favoriser, le cas échéant, leur neutralisation ou leur écoulement par ionisation ou par humidification de l'air et par une liaison conductrice à la terre des opérateurs.

2.1.2 La foudre

C'est une décharge électrique se produisant entre un nuage chargé et le sol. Au sein d'un nuage d'orage, les mouvements d'air ascendant opèrent une séparation des charges électriques apparues par effet triboélectrique sur les précipitations : la partie supérieure du nuage est ainsi chargée positivement alors que sa base est chargée négativement. La surface du sol, sous la base du nuage, se charge par influence positivement : l'espace entre la base du nuage et le sol se trouve alors soumis à un champ électrique qui peut atteindre des valeurs très élevées, 10 à $20 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$, correspondant à des différences de potentiel nuage-sol de 10^7 V . Lorsque le champ électrique atteint un seuil disruptif, un premier éclair jaillit, en général du nuage vers la terre. L'ionisation de l'air qui en résulte facilite les décharges suivantes, généralement plus importantes. Une décharge de foudre correspond à une impulsion de courant dont le front à croissance très rapide, de l'ordre de la μs est suivi d'une décroissance relativement lente de durée supérieure à $10^2 \mu\text{s}$. Les caractéristiques importantes d'une décharge de foudre sont :

- la vitesse maximale de montée du courant : 50 à $100 \text{ kA} \cdot \mu\text{s}^{-1}$;
- le courant crête : 10 à 100 kA ;