

2. Concept de capteur et d'actionneur intelligent

2.1 Définition et caractéristiques

Un capteur (respectivement un actionneur) intelligent est obtenu par l'association de la technologie des capteurs (respectivement des actionneurs), de l'électronique et de l'informatique. Un instrument intelligent (qu'il soit capteur ou actionneur) est un équipement qui intègre des fonctionnalités supplémentaires ou évoluées aptes à améliorer ce pourquoi il a été conçu. Ainsi, en plus de sa fonction élémentaire d'acquisition d'une grandeur physique dans le cas de capteur ou d'influer sur un processus dans le cas de l'actionneur, on attend d'un instrument qu'il offre des fonctions de compensation, de validation, d'autodiagnostic ou encore d'intégration au système de conduite, associées à des moyens de communications adaptés.

C'est au travers de ces nouveaux services qu'un instrument intelligent se distingue d'un composant standard. De manière générale, l'évolution des instruments fait apparaître une gradation allant de l'instrument analogique, à l'instrument numérique puis à l'instrument intelligent avec les limites suivantes :

l'instrument analogique a pour rôle une simple conversion ; pour le capteur il s'agit de la transformation d'une grandeur physique en un signal électrique exploitable ou pour l'actionneur d'un signal en une action sur le processus. Cette fonction ne sera pas détaillée ici, nous renvoyons le lecteur aux différents ouvrages sur le sujet [6] [7] ;

– **l'instrument numérique** offre la même fonction de conversion, mais au travers d'une chaîne de traitements dans laquelle figure une ou plusieurs opérations numériques, susceptible d'améliorer cette fonction élémentaire ; comme par exemple, la numérisation de la mesure en vue de son utilisation par une centrale d'acquisition via une liaison série ;

– **l'instrument « smart »** possède des fonctionnalités qui améliorent ses performances métrologiques, par des fonctions embarquées de mémorisation et de traitement de données ;

– **l'instrument intelligent** enrichit cela d'une capacité à crédibiliser sa fonction associée à une implication plus importante dans la réalisation des fonctions du système auquel il appartient. Cette « crédibilisation » fait référence à une certaine capacité à valider la mesure produite pour le capteur ou à rendre compte de la réalisation effective de l'action pour l'actionneur. Quant à l'« implication plus importante », elle concerne, entre autre, sa participation à la commande du système en intégrant des fonctions de commande-régulation, à la sécurité du système en offrant des possibilités d'alarme, à l'exploitation du système en diffusant des informations relatives à sa maintenance telles que la date du dernier entretien... Les équipements intelligents coopèrent via un système de communication dédié, sélectionnent les données à transmettre, éventuellement, prennent des décisions. L'ensemble constitue l'ossature d'une véritable base de données temps réel.

La classification précédente n'est pas cependant universelle.

Un instrument est souvent considéré comme intelligent dès qu'il intègre au moins un traitement numérique (complexe ou non) et ce quel que soit son apport en terme de services. Outre des raisons de « marketing », ceci est dû à une très grande similitude entre l'architecture matérielle de l'instrument numérique, et celle de l'instrument intelligent. La distinction entre « smart sensor » et « intelligent sensor » est illustrée par la figure 4.

Par la suite, on adoptera cette dernière définition dans laquelle l'instrument n'est considéré comme intelligent que par les fonctions complémentaires qu'il est susceptible de rendre.

D'un point de vue matériel, un instrument intelligent se compose alors de trois sous-ensembles :

- une unité de traitement numérique (c'est-à-dire une unité de calcul associée à de la mémoire) ;
- une interface de communication permettant un dialogue bidirectionnel numérique avec le reste du système ;
- un transducteur-conditionneur pour le capteur (figure 5) ou un organe d'actionnement pour l'actionneur (figure 6).

Pour conclure, un capteur ou un actionneur intelligent peut être considéré comme un véritable « système embarqué », qui devra posséder son propre système d'exploitation lui permettant de coopérer au sein d'une organisation plus complexe.

2.2 L'instrument intelligent en terme de services

De ce qui précède, un instrument intelligent se caractérise fondamentalement par les fonctions qu'il peut offrir aux intervenants et ce tout au long de son cycle de vie. Dans ce paragraphe, on s'attachera donc à recenser les fonctions caractéristiques de ce type de composant.

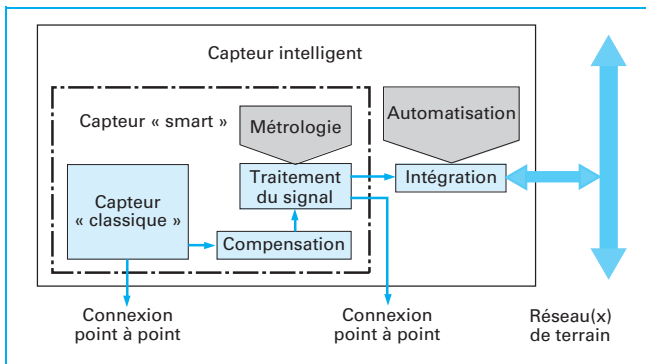


Figure 4 – capteur « smart » et capteur intelligent

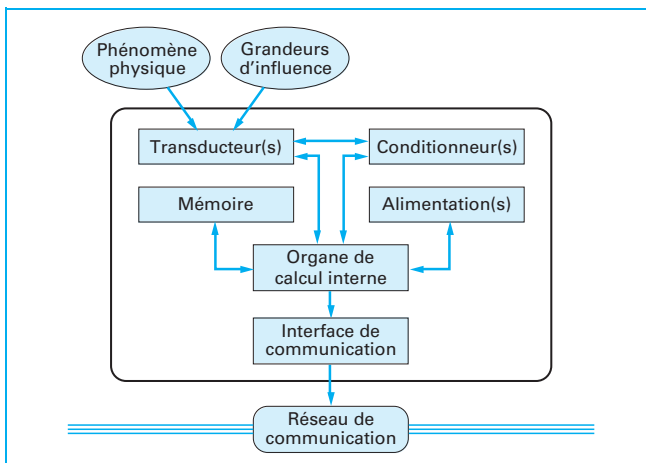


Figure 5 – Architecture matérielle générique d'un capteur intelligent

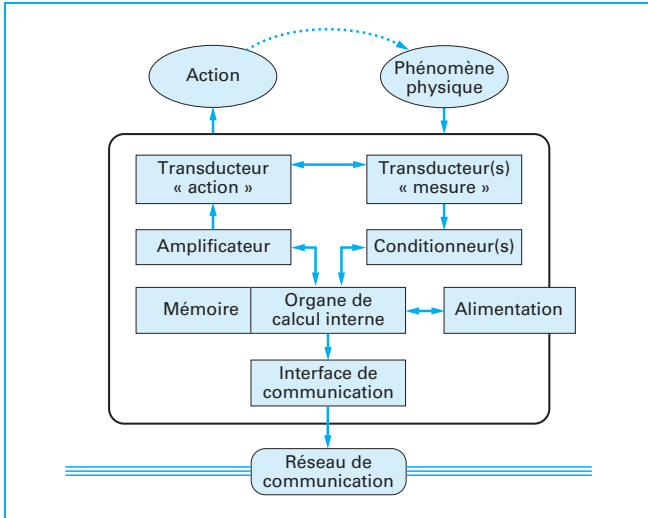


Figure 6 – Architecture matérielle générique d'un actionneur intelligent

2.2.1 Quant à sa mission première

■ Parmi les **fonctions primordiales d'un capteur intelligent**, on peut citer :

- réaliser l'acquisition d'une mesure primaire de la caractéristique physique à mesurer : c'est le travail du corps d'épreuve, du transducteur et du conditionneur de fournir un signal électrique représentatif de la grandeur mesurée ;
- élaborer une image de la grandeur principale en tenant compte des grandeurs d'influence, et des éventuelles non-linéarités de type hystérésis, par exemple : il s'agit d'intégrer d'autres sources d'informations (capteurs locaux ou données externes) afin d'affiner et de corriger la mesure ;
- valider la mesure : il s'agit de crédibiliser la mesure en s'assurant du bon fonctionnement de l'instrument (mesure de tension d'alimentation, de la température de l'électronique), de la cohérence de la mesure soit de manière locale (détection de mesures aberrantes dans une série temporelle), soit en la confrontant à d'autres sources extérieures ;
- fournir une mesure opérationnelle, qui peut être aussi bien une mise en forme dans une unité particulière que l'élaboration d'une grandeur « virtuelle » c'est-à-dire non mesurée directement, mais élaborée à partir de la mesure de plusieurs points (cas d'une moyenne) ou de plusieurs phénomènes physiques ;
- fournir une mesure repérée dans le temps, pour traitement avec d'autres grandeurs issues d'autres équipements en exploitation et également pour constitution d'historiques.

Parmi les qualités exprimées d'un capteur, à savoir justesse, fidélité, exactitude, capacité de portée, sensibilité, linéarité, finesse, rapidité résolution, traçabilité, répétabilité, reproductibilité, l'exactitude est la caractéristique qui est le plus souvent privilégiée par les utilisateurs (figure 7).

Les traitements implantés au sein des capteurs intelligents permettent évidemment d'améliorer les performances en termes d'exactitude, mais peuvent aussi conduire à une augmentation de la rangeabilité de portée qui permet d'utiliser le même capteur dans des gammes diverses.

■ Parmi les **fonctions primordiales d'un actionneur intelligent**, on citera :

- agir sur le processus ;

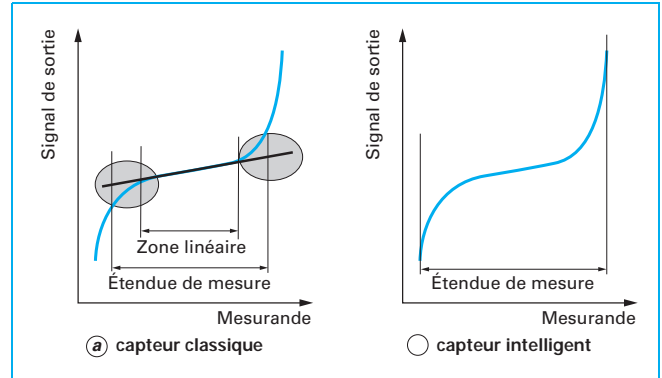


Figure 7 – Rangeabilité, linéarité et exactitude

- informer l'utilisateur de la réalisation effective de l'action : cette activité nécessite l'utilisation de capteurs internes, dits proprioceptifs (génératrice tachymétrique, capteur de position, fin de course...), ou de données externes provenant de capteurs extéroceptifs (capteur de débit, capteur de pression...) rendant compte de l'action ;

- valider l'ordre reçu avant exécution, et vérifier la cohérence par rapport au mode de fonctionnement courant de l'instrument (exemple : pas de commande manuelle lors d'un fonctionnement automatique) ;

- élaborer les ordres à transmettre au préactionneur en fonction d'une consigne donnée par l'utilisateur, compte tenu des grandeurs physiques et des modèles de commande disponibles [commande PID (proportionnelle intégrale dérivée), commande optimale, commande autoadaptative, commande floue...].

2.2.2 Quant à son intégration au système

À cet ensemble de fonctions relatives à la mission première, on peut attendre d'un instrument intelligent d'autres fonctions aptes à favoriser son intégration au sein d'un système d'automatisation. Parmi celles-ci, on peut recenser les suivantes :

- offrir une communication évoluée permettant un dialogue numérique avec les autres équipements du système d'automatisation, en l'occurrence de préférence via un réseau de terrain acceptant une diffusion des informations entre tous les équipements ;

- générer des grandeurs « virtuelles », c'est-à-dire non directement mesurées, mais élaborées à partir des grandeurs physiques disponibles et des modèles de calcul (exemples : génération d'alarmes en cas de défaillance détectée, historiques des dernières valeurs délivrées, des dépassements de seuils, des modifications de paramétrages, des consignes, etc.) ;

- fournir une image des grandeurs physiques locales grâce aux capteurs proprioceptifs : ceci à des fins de détection de défaut par comparaison avec d'autres mesures d'autres instruments, puis à des fins de diagnostic de l'instrument ;

- permettre un passage automatique dans une position de repli sur certains dysfonctionnements ;

- offrir des possibilités d'autocalibration, l'instrument choisissant automatiquement l'échelle la mieux adaptée aux grandeurs à mesurer, ou au niveau d'amplitude voulu des actions ;

- permettre un étalonnage des chaînes de mesures et de tests chaînes d'actionnement en ligne, soit grâce à des dispositifs uniquement internes tels que des grandeurs étalons (pour les capteurs) ou la capacité de réaliser des cycles tests de manœuvres (pour les actionneurs), soit en collaboration avec d'autres équipements lorsque le processus a été conçu pour permettre une configuration d'étalonnage ou de test ;

- offrir des possibilités de reconfiguration en ligne... ;
- mémoriser des informations en temps réel sur des dysfonctionnements et, éventuellement, diagnostiquer des défauts, (type, nature...);
- possibilités d'autosurveillance, en particulier pour les équipements sollicités ponctuellement ;
- proposer une configuration par défaut, un éditeur de configuration, une validation des paramètres saisis... ;
- stocker in situ diverses informations constructeur tel que le numéro de série, la date de fabrication, voire le lien avec la documentation ou les plans... permettant un meilleur suivi de produit ;
- générer des informations pour la gestion technique tel que le nombre d'heures de fonctionnement, le nombre de manœuvres, la consommation...

De cela, on constate que les apports de l'instrumentation intelligente concernent :

- l'installation du système : en aidant à la réalisation et la mise en service du système, grâce à une simplification et à une économie de câblage, et grâce à un nombre moins important d'équipements ;
- l'exploitation : en facilitant les changements de mode de fonctionnement du système (exemple : changement de production), en favorisant l'accès aux paramètres utiles du processus dans le cas d'activité de supervision ;
- la maintenance : en facilitant et, éventuellement, en réduisant les opérations de maintenance, grâce à des possibilités de télésurveillance, télédiagnostic...

2.2.3 Quant à son cycle de vie

Le capteur (ou l'actionneur) intègre des fonctions utiles lors de la phase d'exploitation, en dehors de cette importante étape, le capteur (ou l'actionneur) connaît d'autres phases du cycle de vie, qui vont de la conception, à la fabrication, à la distribution, puis à l'exploitation au sens large et au démantèlement, avec éventuellement des étapes de stockage. Différents acteurs sont en relation avec lui : fabricant, vendeur, installateur... Ils peuvent aussi également bénéficier de l'intelligence de l'équipement.

Les apports de l'intelligence concernent par exemple :

- la possibilité de stocker la fiche signalétique de l'instrument (nom du fabricant, nom du produit, numéro de série, date de fabrication, date de mise à jour du logiciel...);
- la possibilité de surveiller certains paramètres pour s'assurer des bonnes conditions d'utilisation (stockage des valeurs maximales et minimales de certaines grandeurs...);
- le traçage des événements relatifs aux défaillances en vue d'améliorer le produit ;
- éventuellement, la surveillance des conditions de stockage ;
- des services préprogrammés, en permettant une grande modularité quant à l'emploi de ces instruments et en facilitant les éventuelles évolutions du système.

2.2.4 Notion de services et cohérence des services

On constate donc que l'ensemble des fonctions que peut intégrer un instrument, est relativement vaste et nécessite d'être formalisé pour être plus facilement exploitable. La notion de service permet cela. Un service est équivalent à une fonction et correspond au résultat de l'exécution d'un ensemble de traitements. Ainsi, le service fondamental est :

- pour un capteur de fournir l'image d'une grandeur physique ;
- pour un actionneur d'agir sur le processus selon une intensité modulée.

À chaque fonction précédemment énumérée, on peut définir un service (parfois plusieurs), identifié par sa mission, par les données qui lui sont nécessaires ou produites comme résultats, et par les ressources matérielles dont il a besoin.

Concernant ces ressources matérielles, des défaillances peuvent survenir. On peut ainsi distinguer :

- les services dits **nominaux** (pour lesquels toutes les ressources matérielles sont disponibles) ;
- les services dits **dégradés** (lesquels peuvent être rendus malgré qu'une partie de ces ressources soit indisponible, et ce grâce à des traitements de substitution mais certes, de manière peut-être moins efficace) ;
- enfin les services dits **indisponibles** (lorsque l'instrument n'est plus capable de remplir la fonction demandée).

Pour assurer une cohérence de fonctionnement, l'ensemble de ces services se doit d'être organisé. La notion de modes d'utilisation constitue un outil possible pour gérer ces services. Un mode d'utilisation peut être défini comme une répartition cohérente des services mis à disposition ou interdits correspondant à chaque contexte d'emploi de l'instrument. Les modes d'utilisation les plus courants sont : hors service, initialisation, configuration, mode automatique, mode manuel, maintenance, gel, repli. Le mode d'utilisation courant dépend, d'une part, de la disponibilité des services (et indirectement de l'état de l'instrument) et, d'autre part, des ordres des opérateurs. Il limite les possibilités d'action de chaque opérateur et évite indirectement les ordres incohérents, assurant par la même une plus grande fiabilité du système.

Il appartient ainsi au concepteur de déterminer une sélection de services selon le type d'applications auquel est destiné l'instrument, qu'il devra compléter par un agencement des services en mode d'utilisation apte à faciliter l'emploi de l'instrument tout en prévenant les éventuelles erreurs des opérateurs.

2.3 Architecture matérielle de l'instrument intelligent

Des fonctions identifiées précédemment, l'architecture matérielle d'un instrument intelligent peut être déduite. Elle comprend :

- une chaîne principale d'interface avec le processus :
 - dans le cas du capteur : une chaîne d'acquisition, constituée d'un ou plusieurs corps d'épreuve associés à des conditionneurs ; on retrouve ici les composants de base du capteur, permettant de convertir une grandeur physique en un signal électrique, le plus souvent analogique,
 - dans le cas de l'actionneur : une chaîne d'actionnement, constituée par l'élément actif de l'actionneur (l'organe réglant), un moyen de transmission (une chaîne cinématique), un convertisseur (tel qu'un moteur, assurant la transformation d'énergie) ;
- une chaîne de traitement numérique de l'information, incluant :
 - une interface vers le processus ; pour la mesure : multiplexeur, amplificateur, CAN, échantillonneur-bloqueur..., ou pour l'actionnement, un préactionneur ayant le rôle de modulateur d'énergie électrique,
 - un organe de calcul [microcontrôleur, microprocesseur, DSP (Digital Signal Processor), ...] et les périphériques associés (mémoires),
 - une interface de communication qui assure la communication bidirectionnelle vers le système d'automatisation, via un réseau de terrain,
 - une alimentation assurant une stabilisation des tensions nécessaire à l'électronique ; une batterie peut être envisagée pour maintenir certaines activités en l'absence de source d'énergie extérieure (horloge, mémoire...).

À cela et associé aux éléments précédents, il faut adjoindre :

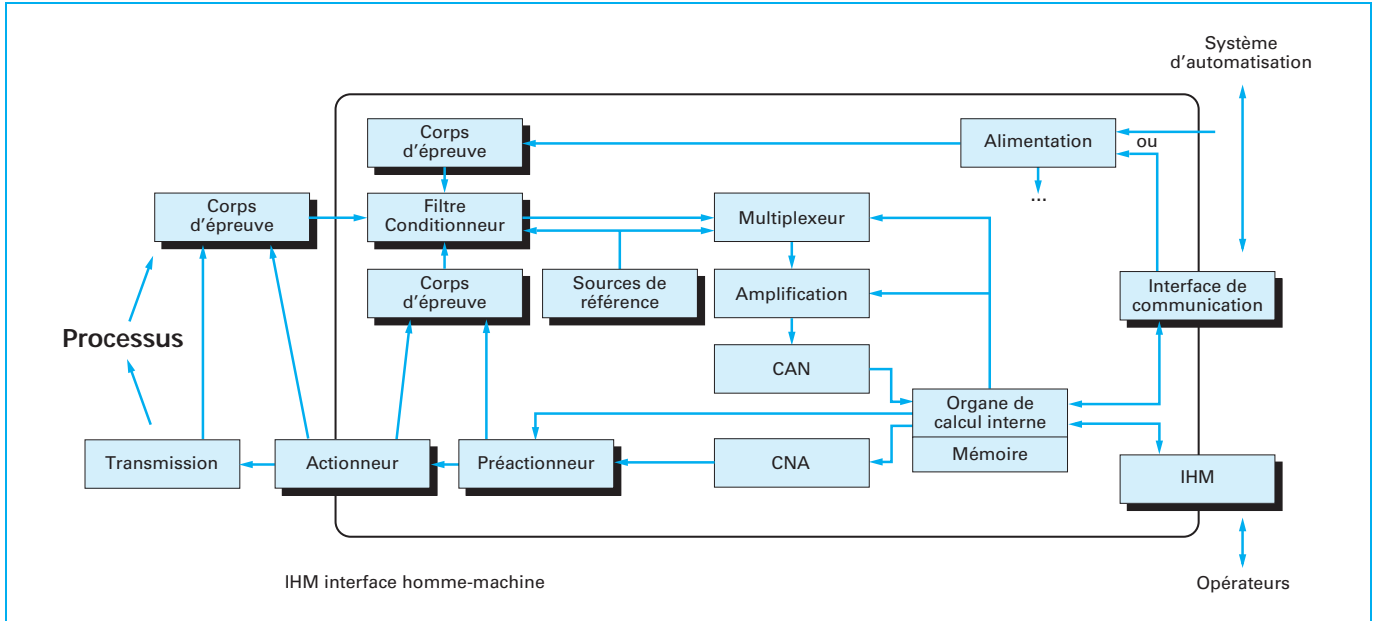


Figure 8 – Architecture matérielle d'un instrument intelligent (capteur et actionneur)

- des dispositifs sensoriels ou moteurs ;
- des capteurs internes ayant un rôle de contrôle de l'état de l'instrument (exemple : couple d'un moteur dans une plage spécifiée), de validation des opérations effectuées (exemple : roue codeuse) ou de compensation (exemple : température interne utilisée pour corriger les dérives des convertisseurs analogiques/numériques) ;
- des possibilités d'actions internes utilisées dans le cas de capteur actif (où une modulation de l'énergie apportée permet d'adapter la mesure à une précision voulue), à des fins de test (où une commutation bascule entre le corps d'épreuve et une source de référence permettant un réétalonnage) ou enfin pour maintenir l'instrument dans un état souhaité (tel qu'un ventilateur asservi permettant une régulation de température de l'électronique).

La figure 8 présente l'organisation de ces éléments au sein d'un instrument intelligent. On y distingue :

- trois emplois de corps d'épreuve, chargés de mesurer les phénomènes physiques du processus (grandeur primaire et d'influence), de surveiller le comportement des ensembles moteurs (préactionneur, actionneur, transmission) et d'établir des mesures technologiques à des fins de contrôle de l'instrument (alimentation, température électronique...);
- la chaîne d'acquisition comprenant des filtres, des conditionneurs, un multiplexeur et un amplificateur et un CAN (convertisseur analogique numérique), dont leur commande permet de sélectionner la source et de s'adapter la mesure au niveau requis. Des sources de référence permettent un contrôle de cette chaîne et, éventuellement, un étalonnage en ligne ;
- la chaîne d'actionnement comprenant éventuellement un CNA (convertisseur numérique analogique), un préactionneur, un actionneur, une transmission de l'énergie ;
- l'organe de calcul associé à une mémoire ;
- l'alimentation avec plusieurs sources d'énergie possible ;
- les interfaces avec les opérateurs ou avec les autres équipements du système.

Selon le cas, tout ou partie des éléments présentés seront implantés. Ainsi dans la configuration minimale, un capteur intelligent comprend : un transducteur, un conditionneur, une interface de communication ; l'alimentation pouvant être fournie par le support de communication.

Si la plupart des éléments de cette architecture sont standards, un problème réside quant au choix de l'interface de communication. Nous aborderons ce point délicat aux paragraphes suivants.

2.4 Spécificité des domaines d'application

Si le domaine du process continu fut le premier à s'intéresser aux capteurs et actionneurs intelligents, les autres domaines tel que le manufacturier, le tertiaire ou les systèmes embarqués sont également demandeurs avec une intelligence appropriée.

Selon les domaines d'application, l'implantation des fonctionnalités se fera de manière différente, allant de l'intelligence spécifique à un équipement et implantée dans cet équipement à une intelligence commune à plusieurs équipements et placée à l'extérieur de ceux-ci (cf. figure 12).

Les différents domaines d'application des capteurs et actionneurs intelligents sont caractérisés par différentes données relatives :

- au procédé lui-même :
 - superficie (quelques m² sur des systèmes embarqués par exemple, à plus de 1 000 m² pour des procédés continus),
 - contraintes d'environnement (fortes dans des procédés chimiques par exemple, faibles dans le tertiaire...),
 - temps de réponse (lent dans des processus verriers par exemple, rapide dans les applications manufacturières...),
 - nombre d'exemplaires (d'une unité pour une usine spécifique ou un bâtiment donné à plusieurs centaines pour des systèmes embarqués) ;

– aux informations échangées :

- type de variables (analogique ou tout ou rien),
- nombre de variables (d'une dizaine pour une machine automatisée à plus d'un millier pour une usine automatisée), etc.

Ces différents critères définissent les limitations techniques tant au niveau des réseaux de terrain qu'au niveau de l'intelligence des équipements.