

Développement de capteurs logiciels pour la mesure en génie électrique

Solutech Ingénierie

1 Contexte économique et scientifique

Depuis plusieurs décennies, les pays industrialisés sont soumis à des contraintes économiques particulièrement critiques qui se voient maintenant amplifiées par l'émergence de nouvelles puissances économiques (Chine, Inde, Brésil). Le faible coût de la main d'oeuvre dans ces pays obligent les anciennes puissances industrielles à trouver des solutions afin d'augmenter leur productivité et la qualité des produits manufacturés. Parmi les enjeux industriels permettant d'augmenter cette productivité les efforts actuels se concentrent sur les points suivants :

- l'optimisation des réglages,
- la détection des anomalies,
- la limitation des arrêts des machines,
- la diminution du taux de rebuts,
- la stabilisation de la qualité de la production.

Beaucoup d'industriels s'accordent pour affirmer que les méthodes globales de planification ont atteint leur limites et que l'amélioration des processus passe par une surveillance au plus près des moyens de production. La tendance est maintenant au traitement en temps réel des données et à leur restitution aux opérateurs pour anticiper les dérives. Cette approche nécessite de multiplier les points de contrôle en déployant un nombre croissant de capteurs. Ce déploiement représente à la fois un coût très important et une nécessité incontournable.

Dans le même temps, les contraintes liées aux problématiques de climat ont fait de la gestion de l'énergie un sujet central. Là aussi, les mesures globales de consommations ne permettent plus de déterminer les sources potentielles d'économie, et l'on s'oriente vers des mesures très localisées. De ce fait la quantité de mesures et par conséquent le nombre de capteurs à déployer s'accroît considérablement.

Ces contraintes fortes sont à l'origine du développement des capteurs logiciels. Ces capteurs possèdent un grand nombre d'avantages par rapport aux capteurs classiques en termes de coût, d'adaptabilité vis à vis du système, de reconfiguration et de communication. Ils constituent un axe de recherche et développement important comme en témoigne le nombre grandissant de collaborations entre l'industrie et les laboratoires universitaires.

Le projet présenté ici concerne le **développement de capteurs logiciels en génie électrique**. Il s'appuie essentiellement sur des outils de l'Automatique (**A1**). Le secteur d'application est le domaine du génie électrique, c'est à dire de la mesure logicielle de grandeurs électrique ou issues de procédés mettant en oeuvre une énergie primaire électrique. Ce secteur d'application est en pleine essor car le développement des capteurs logiciels a jusqu'alors porté sur les procédés chimiques et biologiques pour lesquels les capteurs traditionnels sont souvent complexes et onéreux.

De manière générale nous désignerons comme capteur logiciel un capteur dont tout ou partie de la fonction de mesure (on entend par mesure, la mesure proprement dite, le traitement et la transmission) est réalisée par un système informatique. Ainsi, on peut définir les deux familles suivantes :

- Les capteurs intelligents. Ce sont des capteurs dans lesquels la mesure se fait de façon classique mais qui possèdent des fonctionnalités supplémentaires (autocalibration, communication..) réalisées par un micro-processeur.
- les capteurs virtuels qui opèrent l'estimation d'une grandeur à partir de mesures d'autres grandeurs plus accessibles.

2 Etat de l'art

2.1 Capteurs intelligents

D'un point de vue matériel un capteur intelligent est composé (figure 1) :

- d'un transducteur-conditionneur,
- d'une unité de traitement numérique associée à de la mémoire,
- d'une interface de communication permettant un dialogue bidirectionnel numérique avec le reste du système.

Il met donc en oeuvre une mesure directe de la grandeur principale au travers d'un capteur physique traditionnel.

D'un point de vue fonctionnel, un capteur intelligent propose des possibilités de communication, de configuration, d'autodiagnostic et de validation, en plus des fonctionnalités de mesure (figure 2).

Fonctionnalité MESURE : elle intègre la métrologie et le traitement du signal. Elle met à disposition une mesure opérationnelle issue de mesures primaires (grandeur principale), corrigée éventuellement grâce à des mesures auxiliaires, validée par référence à des modèles et surtout repérées dans le

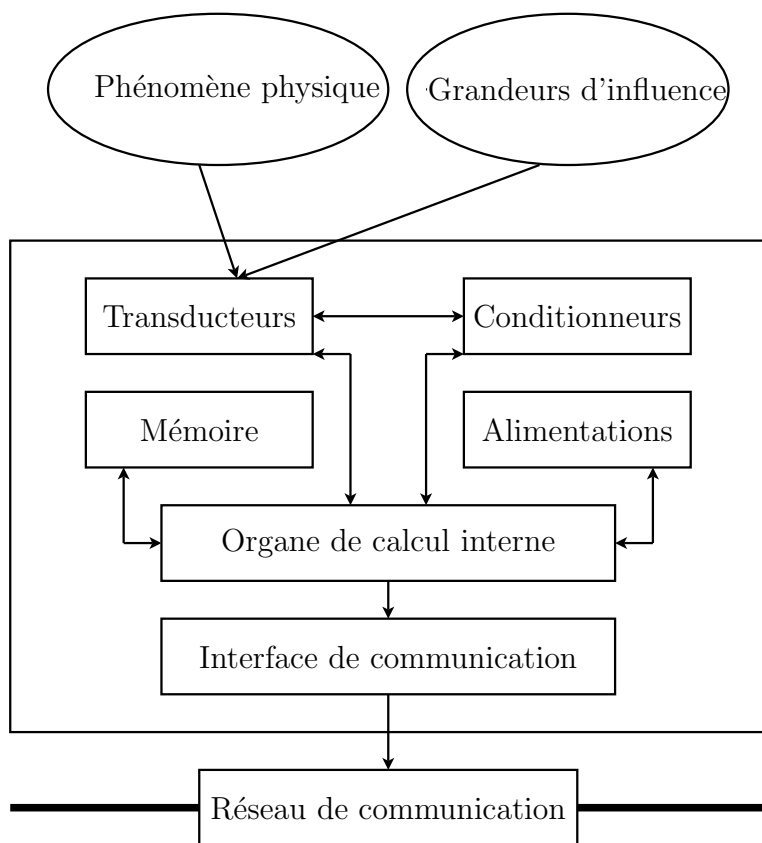


FIGURE 1 – Architecture matérielle d'un capteur intelligent

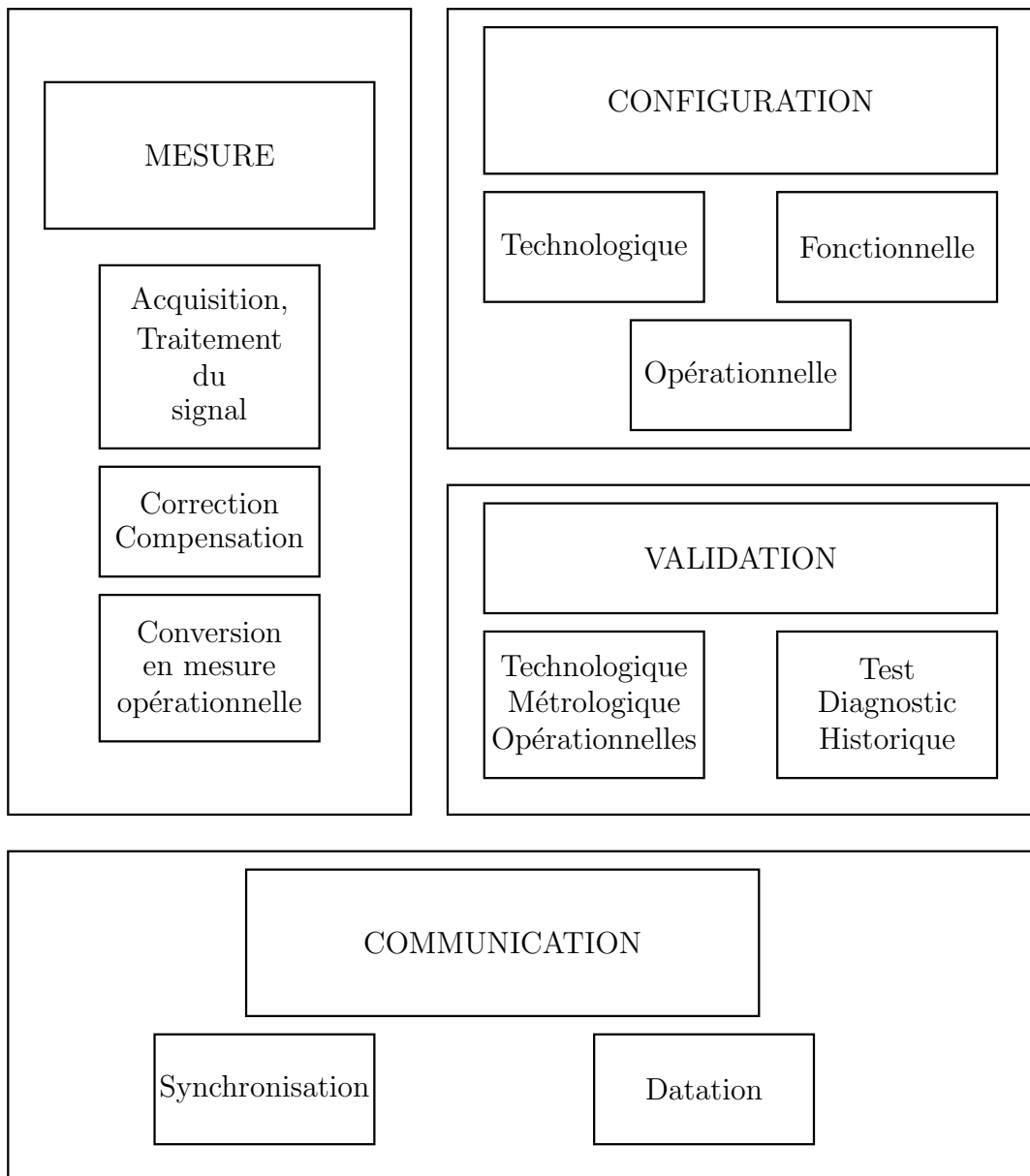


FIGURE 2 – Architecture fonctionnelle d'un capteur intelligent

temps.

Fonctionnalité VALIDATION : la mesure fonctionnelle est validée par la prise en compte de paramètres caractérisant le bon fonctionnement du capteurs tels que la mesure de la tension d'alimentation, la mesure de la température de l'électronique, la vérification du bon déroulement d'un algorithme, la détection d'une variation dans l'étendue de mesure, de mesures aberrantes...).

Fonctionnalité CONFIGURATION : elle regroupe les configurations technologique, fonctionnelle et opérationnelle.

Fonctionnalité COMMUNICATION : elle assure l'échange d'information entre le capteur intelligent et son environnement.

Ces fonctionnalités supplémentaires permettent de définir un certain nombre d'applications dans lesquelles l'emploi de capteurs intelligent apporte une réelle plus value :

- Augmentation de la performance des capteurs standards,
- compensation de non linéarité,
- surveillance de capteurs,
- intégration dans des systèmes de surveillance.

Enfin on notera que les capteurs intelligents constituent une sous ensemble des *instruments intelligents* qui regroupent capteurs et actionneurs.

2.2 Capteurs virtuels

Un capteur virtuel est un algorithme permettant d'estimer une grandeur physique non directement mesurée. Ce type de capteur est très utilisé dans les procédés où les capteurs traditionnels sont complexes ou très onéreux. De manière générale, on utilise un modèle mathématique du procédé associé à des mesures facilement accessibles. En automatique, ces capteurs virtuels sont nommés observateurs. L'algorithme permet l'estimation de variables d'état du modèle à partir des mesures disponibles, en général les sorties du modèle (Figure 3). Cette estimation est conditionnée par l'observabilité du modèle qui définit si l'estimation des variables d'état recherchées est possible à partir de la structure du modèle et des mesures disponibles.

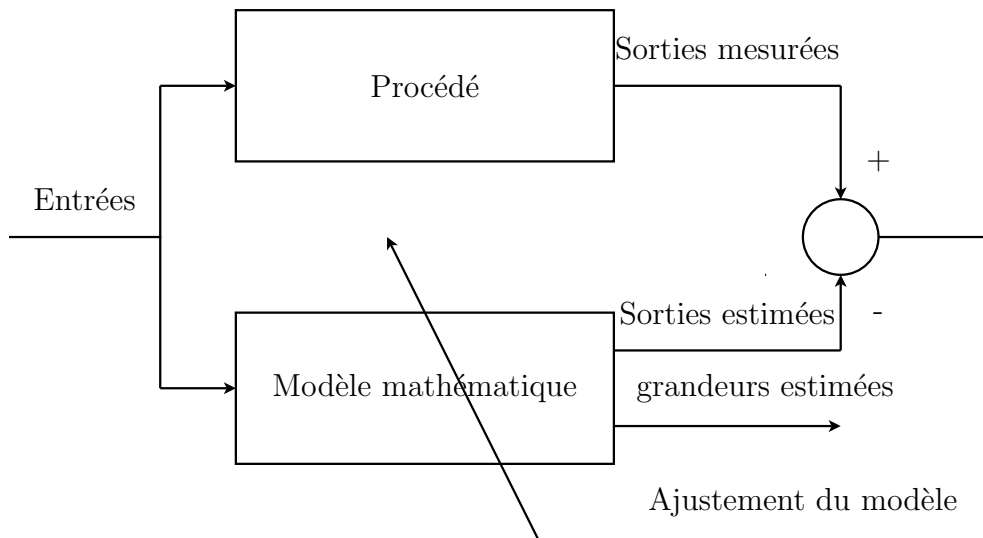


FIGURE 3 – Schéma de principe d'un capteur virtuel

Le développement d'un capteur virtuel suit, dans un premier temps, les étapes décrites par la figure 4.

Sélection des données : dans les systèmes complexes, le nombre de données mesurées peut-être important et toutes ne sont pas forcément adaptées pour obtenir une modélisation correcte. Il est donc indispensable de sélectionner les données pertinentes avec l'aide précieuse des spécialistes du système observé. A titre d' exemple, les périodes d'échantillonnage utilisées pour la collecte des données n'est pas forcément adaptée au processus d'identification, un post traitement est souvent nécessaire comme un sur-échantillonnage par exemple. On notera aussi les problèmes liés à la compression des données (gain en termes de sauvegarde informatique), aux pertes de données suite à la défaillance de capteurs, aux erreurs de mesure, aux problèmes de transmission de données. De manière générale, les techniques de pré-filtrage permettent d'adapter les données collectées au processus d'identification.

Choix du modèle : les modèles utilisables pour le développement de capteurs peuvent être classés en fonction du degré de connaissance du système. Ces modèles peuvent être obtenus à partir de modèles physiques (nécessitant une connaissance parfaite du système), de modèle type " boîte grise " ou de type boîte noire. Par ailleurs des combinaisons de ces différents modèles

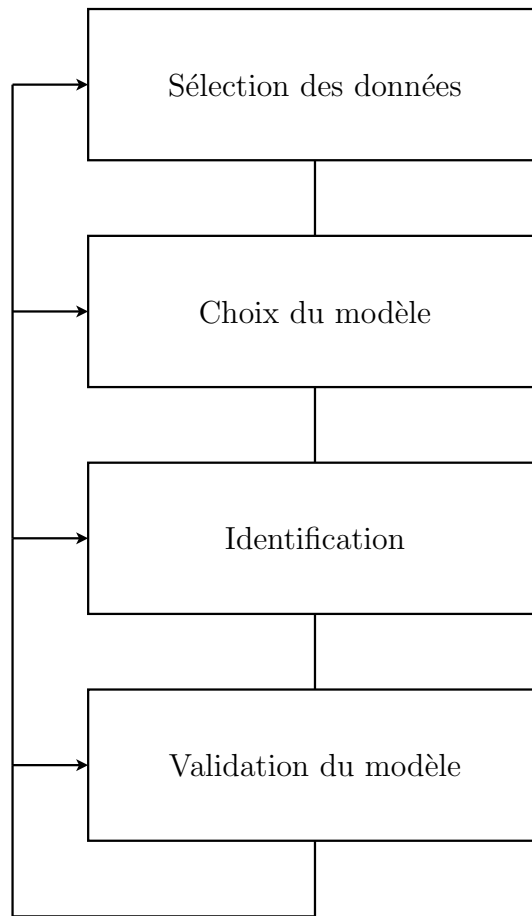


FIGURE 4 – Phases du développement d'un capteur virtuel

peuvent être mises en œuvre. L'approche " modèle physique " que nous développons plus particulièrement dans ce mémoire est par essence limitée aux systèmes de taille relativement réduite (sous-systèmes d'un ensemble plus complexe) pour des raisons de complexité et de temps de calcul.

Identification : cette phase consiste à estimer les paramètres du modèle avant son utilisation en tant que capteur virtuel. C'est une phase cruciale qui peut se révéler difficile sur certaines applications industrielles. En effet, si pour les systèmes linéaires les méthodes de types moindres carrés fonctionnent bien, il n'en est pas de même en non linéaire. Dans ce dernier cas, des méthodologies alternatives sont mis en œuvre comme les réseaux de neurones ou les systèmes flous. Par ailleurs, la nature des signaux d'excitation nécessaires à une identification correcte peut être très différente des entrées naturelles du système et difficile à mettre en œuvre en pratique.

Validation du modèle : Cette phase consiste à vérifier que le modèle obtenu est correcte quelque soit le mode de fonctionnement du système. Les données servant à la validation doivent être différentes de celles utilisées pour l'identification. En règle générale, la validation est vue du point de vue de l'identification. En linéaire, cette phase est relativement simplifiée et basée sur le calcul de l'auto-corrélation des résidus ou de l'inter-corrélation entre les résidus et les entrées. En non-linéaire, la validation est souvent difficile à établir d'un point de vue théorique et on utilise en pratique des méthodes graphiques (tracé des 4 courbes : résidus, lag plot, histogramme, probabilité normale). La phase de validation est cruciale dans le développement d'un capteur virtuel. De ce fait, le résultat de la validation peut conduire à reconsidérer une ou plusieurs des trois autres phases (sélection des données, choix du modèle, identification).

Les capteurs virtuels trouvent une place privilégiée dans les applications industrielles complexes où l'accroissement du nombre de capteurs est un facteur indispensable à l'amélioration de la productivité. Dans ce cadre, le remplacement complet de capteurs physiques par des capteurs virtuels est un enjeu important et de plus en plus d'actualité. Cette migration technologique s'accompagne de nombreux problèmes tels que la validation ou la reconfiguration du capteur virtuel lorsque les paramètres du système viennent à changer.

Un autre aspect est la diminution du délai de mesure et l'utilisation de capteurs virtuels dans un cadre d'estimation en temps réel. Dans certains procédés, la mesure recherchée peut nécessiter un temps de calcul relativement long et être déportée loin du processus lui-même comme en chromato-

graphie par exemple. Par l'utilisation de capteurs virtuels, certaines mesures effectuées jadis hors ligne peuvent être obtenues plus rapidement et même être utilisées dans le processus de contrôle.

Les capteurs virtuels peuvent aussi trouver une place importante dans des environnements hostiles où des capteurs traditionnels pourraient être mis en défaut de par leur constitution. Par ailleurs, la surveillance de capteurs physiques est un champ d'application important et participe à la maintenance prédictive des systèmes. Enfin, on notera l'apport grandissant des capteurs virtuels dans les applications de détection de fautes et de diagnostic intervenant au niveau de la supervision du système.

Trois pistes de développement sont actuellement développées :

- Définir une solution technologique optimale permettant d'intégrer un capteur logiciel dans une structure matérielle proche de celle des capteurs traditionnels ;
- l'adaptation aux contraintes industrielles des méthodes d'identification issues de l'automatique ;
- la contrainte de généralité des modèles.