HAL
open science

Proposition de systèmes d'aide à la décision par formalisation et agrégation de connaissances

C. Curt

To cite this version:

C. Curt. Proposition de systèmes d'aide à la décision par formalisation et agrégation de connaissances. 8ème congrès international de génie industriel, Bagnères de Bigorre, 10-12 juin 2009, Jun 2009, Bagnères de Bigorre, France. p. - p. hal-00585554

HAL Id: hal-00585554

https://hal.science/hal-00585554v1

Submitted on 13 Apr 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

in :8ème congrès international de génie industriel, Bagnères de Bigorre, 10-12 juin 2009

Proposition de systèmes d'aide à la décision par formalisation et agrégation de connaissances

CORINNE CURT

Cemagref – Unité de recherche Ouvrages Hydrauliques et Hydrologie
3275 Route de Cézanne – CS 40061 – 13182 Aix-en-Provence cedex 5
corinne.curt@cemagref.fr

***Résumé* – La qualité des produits et la sécurité des procédés sont des caractéristiques importantes pour les organisations industrielles. La maîtrise de ces caractéristiques passe par la maîtrise des processus physiques, informationnels et décisionnels. L'objet de cet article est l'amélioration des processus décisionnels. Il s'agit de proposer des méthodes visant à développer des outils d'aide à la décision pour l'évaluation et le contrôle des caractéristiques de qualité et de sécurité. Ces méthodes prennent en compte des connaissances de différentes natures et notamment celles détenues par les experts. Nous avons développé des méthodologies de recueil, de formalisation et de modélisation des connaissances adaptées au système étudié et à l'objectif visé : mesure, évaluation, contrôle. Deux domaines constituent le support de ces recherches : le génie des procédés principalement alimentaire pour lequel l'objectif est la maîtrise des caractéristiques des produits au cours de leur fabrication et le génie civil pour lequel l'objectif est la maîtrise de la sécurité des barrages.**

***Abstract* – Product quality and processes safety are two characteristics of main importance for industrial organizations. The control of these characteristics is achieved through the control of physical, informational and decision-making processes. The object of this article is the improvement of decision-making processes. It aims at proposing methods to develop decision support tools for the assessment and the control of quality and safety characteristics. These methods take into account knowledge of various types in particular those held by experts. We developed methodologies of knowledge collection, formalization and modelling adapted to the studied system and to the objective: measurement, evaluation, control. Two domains constitute the support of these researches: process engineering mainly concerned with food process applications and civil engineering for the control of dam safety.**

***Mots clés* – système d'aide à la décision – qualité – sécurité – contrôle – mesure.**
***Keywords* – decision support system – quality – safety – control – measurement.**

1 INTRODUCTION

La qualité des produits et la sécurité des procédés sont des caractéristiques importantes pour les organisations industrielles. En effet, les variations de qualité ou les défauts sont un problème à plusieurs titres. Ils peuvent générer un risque économique à plusieurs niveaux :

- s'ils sont détectés en sortie d'usine, entraîner un blocage des produits ou un déclassement ;
- s'ils sont repérés par le distributeur, générer une perte de référencement ;
- s'ils sont décelés par le consommateur, donner à ce dernier une mauvaise image de la marque, occasionner des retours de produits défectueux vers l'usine, susciter un non-rachat du produit et causer à terme une perte de confiance du consommateur envers le produit, la marque voire la classe de produits à laquelle appartient le produit incriminé ;
- ne pas être détectés avant consommation ou utilisation et avoir des répercussions pouvant être graves sur la santé du consommateur.

De la même manière, la dégradation de la sécurité d'un processus liée au vieillissement du système ou à des défauts de conception ou de réalisation peut entraîner :

- des dégradations structurelles ou fonctionnelles ayant des conséquences techniques comme le vieillissement accéléré, la déqualification ou la nécessité de réhabilitation, ou économiques ;
- des défaillances pouvant donner lieu à des événements dramatiques (explosion, incendie, rupture d'ouvrages hydrauliques…).

La maîtrise de ces caractéristiques passe par la maîtrise des processus physiques, informationnels et décisionnels. L'objet de cet article est l'amélioration des processus décisionnels. Il s'agit de proposer des méthodes visant à mettre en place des outils d'aide à la décision pour maîtriser les caractéristiques de qualité et de sécurité. Ces méthodes reposent sur le développement de modèles d'évaluation et de contrôle.

Or, le développement de modèles peut poser des difficultés dans le cas de certains systèmes complexes du fait de la nature des données d'entrée puis de la modélisation proprement dite. Ainsi, pour certains systèmes comme les procédés alimentaires ou les barrages, les mesures disponibles pour caractériser le systèmes ont des caractéristiques et des formats très différents : mesures globales et mesures ponctuelles, données symboliques et numériques, mesures directes et indirectes, mesures temps

réel et mesures différées, mesures brutes ou mesures traitées, valeurs absolues et tendances, mesures plus ou moins disponibles, précises et certaines. Par ailleurs, les approches classiques de modélisation ne peuvent pas toujours être employées du fait de la compréhension incomplète des réactions se déroulant dans le système, de l'occurrence de phénomènes aux origines variées (chimiques, physiques, biologiques) et souvent en interaction, du nombre de variables très important, du caractère unique du système (cas des barrages), de cinétiques mal connues et non linéaires, de données d'entrée non continues…

Dans ce cadre, afin de tirer partie de toutes ces informations, il est tout à fait pertinent de prendre en compte des connaissances de différentes natures et notamment celles détenues par des experts, pour établir des systèmes d'aide à l'évaluation et au contrôle des systèmes considérés. De manière générale, les différentes connaissances manipulables se présentent sous une forme soit explicite, soit tacite [Grundstein et Barthès, 1996].

Les connaissances explicites constituent les savoirs de l'entreprise (ou plus largement du domaine) : connaissances formalisées et spécialisées, elles se présentent sous la forme de données, procédures, modèles, algorithmes, documents d'analyse, synthèses, plans… Hétérogènes, incomplètes ou redondantes, elles n'expriment pas le « non-dit » de ceux qui les ont formalisées. Ce sont des connaissances réparties.

Les connaissances tacites constituent des savoir-faire de l'entreprise : connaissances explicitables ou non et adaptatives qui concernent des contextes décisionnels, habiletés, tours de main, « secrets de métier », routine, culture d'entreprise… Ce sont des connaissances acquises par la pratique, souvent par apprentissage collectif implicite ou par une logique « maître-apprenti ». Elles sont localisées. Dans nos travaux, nous avons distingué différents types de savoir-faire établis par des opérateurs ou des experts :

- ***« savoir-mesurer »*** : mettre en place des mesures sensorielles directement réalisées sur site (mesure visuelle de la taille des morceaux dans une émulsion de viande, détection du défaut de « croûtage » sur un saucisson sec par mesure sensorielle de texture faite par l'opérateur, observation visuelle d'une fuite sur un barrage…) ;
- ***« savoir-évaluer »*** : combiner différentes connaissances tacites et/ou explicites pour obtenir une évaluation globale du système ;
- ***« savoir-contrôler »*** : engager les actions nécessaires à la correction d'une dégradation pour replacer le processus dans son état de fonctionnement nominal, en affectant un délai de réalisation ;
- ***« savoir-diagnostiquer »*** : établir les causes d'une dégradation ;
- ***« savoir-pronostiquer »*** : prédire les évolutions au sein du système et établir leurs conséquences.

Ces connaissances tacites sont très intéressantes pour le développement d'outils d'aide à la décision : il est donc pertinent d'identifier les différents savoirs et savoir-faire, de les expliciter et de les agréger, le cas échéant, avec des connaissances explicites. En effet, chaque source d'information ou de connaissances prise isolément, ne suffit pas généralement à caractériser le comportement du système. Des méthodologies de recueil, de formalisation et de modélisation sont donc à proposer et à adapter le cas échéant au système étudié et à l'objectif de la recherche : mesure, évaluation, diagnostic… Cet article vise à présenter des méthodes et des outils que nous avons développés pour la mesure, l'évaluation et le contrôle (Figure 1). Deux domaines constituent le support de ces recherches : le génie des procédés principalement alimentaire pour lequel l'objectif est la maîtrise des caractéristiques des produits au cours de leur fabrication et le génie civil pour lequel l'objectif est la maîtrise de la sécurité d'un ouvrage.

Les sections suivantes présentent tout d'abord la démarche de recueil et de formalisation de connaissances puis les formalismes et modèles proposés pour la mesure, l'évaluation et le contrôle. Ces travaux sont illustrés par des exemples issus du génie des procédés et du génie civil.

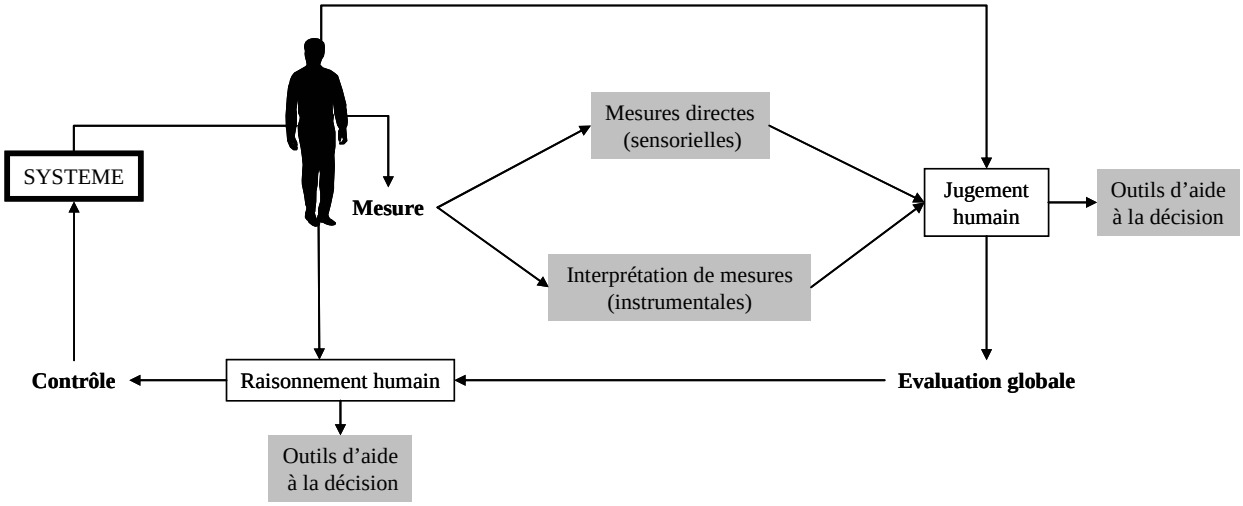

Figure 1. Mesure, évaluation et contrôle impliquant la connaissance humaine

2 METHODOLOGIE DE RECUEIL ET DE FORMALISATION DE CONNAISSANCES

2.1 Déroulement

Le recueil du savoir-faire consiste à réaliser un transfert des connaissances d'un « praticien observé », vers un « observateur », la personne chargée du recueil.

La méthode de recueil et de formalisation du savoir-faire en matière de mesure, d'évaluation et de contrôle du système étudié comporte trois phases principales présentées sur la Figure 2.

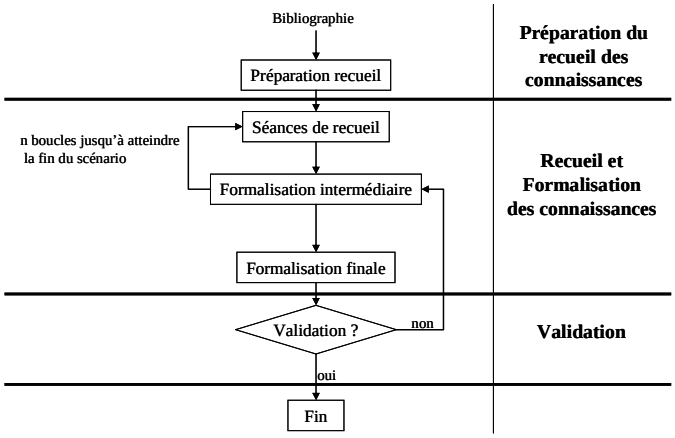

Figure 2. Les différentes étapes du recueil des connaissances

La première phase consiste à préparer les séances de recueil à partir de la littérature existante. Pendant cette étape, il est notamment important pour l'observateur d'appréhender le fonctionnement du système et d'acquérir les termes techniques communément employés pour caractériser le système étudié. Ceci permet de faciliter la relation future avec les opérateurs et experts qui seront interviewés et d'augmenter l'efficacité des séances de recueil.

La deuxième phase correspond à la phase de recueil et de formalisation des connaissances. Ce sont des cycles de recueil et de formalisation qui s'enchaînent :

- des séances d'observations et des entretiens libres : l'expert effectue la tâche à réaliser dans son cadre habituel, en donnant les différents éléments nécessaires à la réalisation de celle-ci. Les questions posées lors des entretiens sont souvent ouvertes c'est-à-dire que l'expert s'exprime librement ;
- des entretiens, pendant lesquels le ou les experts travaillent à partir de documents, sont réalisés. Ils ont pour but de compléter les informations acquises au cours des séances d'observation : il n'est en effet pas possible, sauf à suivre le système sur une période très longue, de pouvoir observer tous les cas. Il faut donc les simuler à partir de questionnaires. Ces derniers doivent être simples à comprendre, même si l'observateur est présent et peut aider à l'analyse ;
- l'observateur enregistre les déclarations des experts et effectue des formalisations intermédiaires de la connaissance nécessaire pour mener à bien la tâche.

Lors des entretiens, quelques outils peuvent faciliter la compréhension et resituer l'expert dans le contexte comme des illustrations, des exemples simples. Il est également opportun de :

- commencer par les cas les plus simples et d'amener les cas plus compliqués au fur et à mesure ;
- s'assurer que les questions s'enchaînent logiquement ;
- passer éventuellement à un cas suivant si le cas traité pose un problème à l'expert ; il suffit alors d'y revenir plus tard ;
- de laisser à l'opérateur le temps de réfléchir et de se replacer dans le contexte de l'atelier notamment pour la quantification des actions.

Dans une troisième phase, une formalisation définitive des connaissances extraites est menée puis validée par l'expert. Ces validations prennent la forme de simulations (cas simplifiés ou entretiens au bureau) et de validations en vraie grandeur (suivi et actions sur le procédé en usine, analyse d'ouvrages in situ).

2.2 Relation expert-observateur

La relation entre l'expert et l'observateur est essentielle dans la construction de la démarche proposée et la phase de recueil peut être considérée comme une phase critique. Les experts doivent être prêts à divulguer leur savoir : il s'agit d'instaurer dès le départ un climat de confiance entre l'expert et l'observateur qui passe notamment par une description précise des objectifs du recueil et de la formalisation. Une fois le climat de confiance installé, la motivation doit être maintenue. Plusieurs outils sont utiles pour répondre à cet objectif :

- tenir les experts au courant des progrès du projet, leur montrer l'avancement du recueil et de la formalisation avec des outils qui permettent une visualisation rapide de cet avancement sous la forme de courbes essentiellement, tableaux, schémas, développement d'outils comme des interfaces… ;
- montrer et transmettre son enthousiasme ;
- se rendre disponible quand les experts le sont. Les experts sont souvent peu disponibles car ils ont d'autres tâches à réaliser, mais un expert motivé se rendra a priori disponible plus facilement qu'un expert non motivé ;
- se placer dans une situation d'écoute tout en dirigeant les entretiens.

Le nombre d'experts est variable selon les cas rencontrés : d'un expert unique à groupe d'experts. Dans ce dernier cas, la mise au point d'un outil d'aide à la décision passe par l'obtention d'un consensus entre les experts et la gestion de problèmes de vocabulaire éventuels, les experts n'ayant pas forcément une terminologie commune.

Ces méthodologies de recueil et formalisation ont été déclinées et adaptées en fonction de l'objectif de formalisation visé : mesure, évaluation ou contrôle.

3 MESURE

Dans de nombreux cas, certaines caractéristiques ou propriétés d'un système sont très difficiles à quantifier par voie instrumentale du fait du coût et du manque de capteurs fiables et adaptés à la caractéristique à mesurer [Trystram et Courtois, 1998]. L'évaluation humaine est ainsi largement

acceptée comme un outil pour l'évaluation dans différents domaines.

Nous distinguons deux rôles concernant le champ de la mesure (Figure 1) : soit les Hommes utilisent des données qu'ils obtiennent directement sur le système par évaluation sensorielle (mesure visuelle, mesure de texture…), soit ils utilisent des données provenant d'instruments de mesure (thermomètre, appareils de laboratoire, débitmètres…).

3.1 Mesure directe

Une méthode pour capitaliser le savoir des opérateurs ou experts en matière de mesures sensorielles sur site (usine de transformation, ouvrage hydraulique) a été proposée [Curt et al., 2001]. Un espace de représentation commun appelé « indicateur sensoriel » a été développé. Cette méthode est basée sur une grille composée de sept éléments : nom, définition, mode opératoire, échelles et références sur l'échelle, caractéristiques spatiales (échantillonnage, localisation de la mesure) et caractéristiques de temps (fréquence de la mesure, fréquence de l'analyse…). Les indicateurs sensoriels peuvent être basés sur des sens différents : vision, toucher, odeur, goût et audition. Le Tableau 1 et le Tableau 2 présentent des exemples d'indicateurs formalisés : un indicateur basé sur une mesure de texture dans le domaine de la qualité des produits alimentaires en cours de fabrication et un indicateur visuel dans le domaine de la sécurité des barrages.

Les échelles utilisées sont différentes pour les deux exemples. Le choix de l'échelle doit être adapté à chacun des cas : ainsi, six jalons ont été définis comme pertinents pour caractériser l'ensemble du domaine d'évolution de l'indicateur « Humidité à la surface » et onze jalons ont été définis pour caractériser le domaine de variation de l'indicateur « Fontis – Cônes d'affaissement ». Dans ce dernier cas, l'échelle est inversée (0 correspond au qualificatif « excellent » et 10 au qualificatif « inacceptable »). Ceci résulte d'un choix des experts justifié par le fait que les indicateurs utilisés sont des indicateurs de dégradation : plus la dégradation est forte, plus la note est élevée.

Tableau 1. Description de l'indicateur basé sur une mesure de texture « Humidité à la surface »

Nom	Taille des particules de gras
Définition	Moyenne de la taille des particules de gras à la fin de l'émulsification
Mode opératoire	Prendre un échantillon de produit (environ 5 g) entre le pouce et l'index. Séparer les particules de gras de la pâte en faisant glisser le pouce sur l'index. Evaluer la taille des particules. Répéter l'opération trois fois
Echelle et référence	Echelle de 0 à 6 0 : grande (taille moyenne supérieure à 10 mm) 3 : moyenne (taille moyenne égale à 5 mm) 6 : petite (aucune particule perceptible)
Caractéristique de lieu	Echantillon prélevé en périphérie au centre de l'appareil
Caractéristique de temps	Echantillon prélevé à la fin de l'opération d'émulsification

Tableau 2. Description de l'indicateur visuel "Fontis – cône d'affaissement"

Nom	Fontis – cônes d'affaissement
Définition	Effondrement de terrain localisé, souvent en forme d'entonnoir provoqué par la présence d'un vide qui se propage verticalement vers la surface du barrage. Se traduit par un affaissement du terrain (cône) ou la présence d'un trou (fontis)
Echelle et référence	Echelle de 0 (excellent) à 10 (inacceptable) 0 : absence de fontis ou de cône d'affaissement 6 : fontis isolé, de petite taille (quelques dm) et ancien (quelques années) OU suspicion de fontis (cônes d'affaissement) 7 – 9 : fontis isolé, de petite taille, et récent (<1 an) OU fontis isolé, de grande taille et ancien 10 : fontis de grande taille et récent
Caractéristique de lieu	Crête ou talus aval ou talus amont
Caractéristique de temps	Evaluation menée une fois par semaine

Dans cette approche, les experts sont considérés comme des instruments de mesure. A ce titre, leurs performances métrologiques doivent être déterminées et en particulier leur répétabilité et leur résolution. Elles sont définies par [AFNOR, 1994] :

- la répétabilité : « étroitesse de l'accord entre les résultats des mesurages successifs du même mesurande, mesurages effectués dans la totalité des mêmes conditions de mesure »;
- la résolution : « la plus petite différence d'indication d'un dispositif afficheur qui peut être perçue de manière significative ». Cette caractéristique renvoie au pouvoir discriminant des opérateurs.

Dans le cas où plusieurs experts évaluent le système, la reproductibilité définie comme [AFNOR, 1994] « étroitesse de l'accord entre les résultats des mesurages successifs du même mesurande, mesurages effectués en faisant varier les conditions de mesure » peut également être évaluée.

Nous avons proposé une méthodologie pour déterminer ces caractéristiques métrologiques [Curt et al., 2004c]. Basée sur des mesures réalisées plusieurs fois par les experts et sur un traitement statistique des résultats, cette méthodologie peut aussi être appliquée pour le suivi métrologique des opérateurs au cours du temps. Au final, cette méthode permet une description formelle et une transmission du savoir-faire. Nous avons montré qu'il était possible d'entraîner un nouvel opérateur à la réalisation de la mesure.

Ce concept d'indicateur sensoriel a permis de formaliser les mesures sensorielles réalisées par les opérateurs ou les experts dans le cas de nombreux procédés alimentaires (étuvage et séchage du saucisson sec, cuisson de biscuits, émulsification de viande…), dans le cas d'un procédé non alimentaire (centrifugation de boues de station d'épuration) et d'ouvrages de génie civil (barrages).

3.2 Interprétation de mesures

Une autre tâche réalisée par l'Homme consiste à traduire des mesures provenant d'instruments ou de données qualitatives dans un format qui permet ensuite leur utilisation pour évaluer le système sous l'angle par exemple de sa sécurité. Une fois traduites sur la même échelle, ces évaluations peuvent être combinées pour obtenir une évaluation globale des produits ou des procédés.

Ce cas se rencontre dans le domaine du génie civil [Curt et al., 2006] où des mesures utilisées par les experts proviennent de sources différentes : inspection visuelle (évaluation de fuites, de fissures…), mesures instrumentales (piézométrie, mesures de débit…), données de conception ou réalisation (pentes, largeur de la crête, nature des matériaux, présence/absence de filtres…) et sorties de modèles mécaniques (gradient hydraulique, capacité d'évacuation des crues…) (cf. Figure 3).

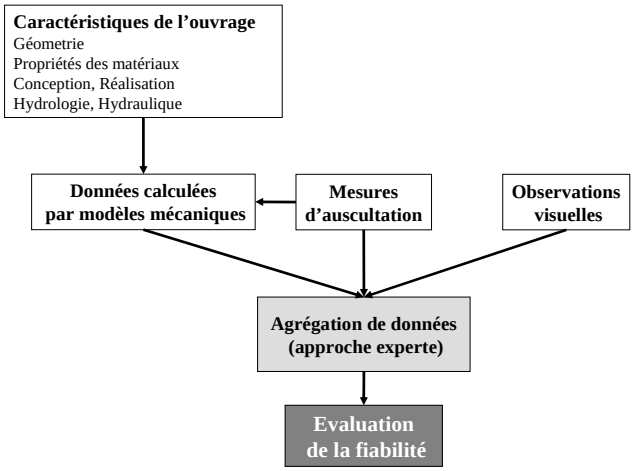

Figure 3. Données utilisées par les experts pour l'évaluation de la sécurité des barrages

La grille de formalisation des indicateurs sensoriels a été conservée : elle permet la description d'indicateurs auscultés qui traduisent les informations issues des instruments, d'indicateurs calculés qui transcrivent les sorties des modèles mécaniques et les indicateurs de conception-réalisation qui renvoient aux données de conception et réalisation. Toutefois, les conditions opératoires sont généralement incluses dans la définition si aucune condition spécifique n'est nécessaire. Ce formalisme permet le respect de critères de répétabilité et de reproductibilité : la notation est guidée par les différents champs de la grille.

Le Tableau 3 fournit un exemple de formalisation d'un indicateur ausculté.

3.3 Conclusion

Le concept des indicateurs permet de formaliser des données de natures très différentes, et notamment des mesures sensorielles réalisées par un opérateur ou un expert. L'intérêt des indicateurs est de recueillir et formaliser des données fiables et répétables au niveau de l'opérateur ou de l'expert dans sa situation de travail.

Les indicateurs permettent de suivre un produit au cours de sa fabrication ou l'évolution d'une caractéristique d'un barrage au cours du temps. Ils peuvent également être utilisés comme variables d'entrée dans des algorithmes d'évaluation globale du système, de contrôle du procédé ou d'optimisation.

Tableau 3. Description de l'indicateur ausculté « Diminution du débit »

Nom	Evolution du débit (diminution)
Définition	La mesure des débits de drainage permet de quantifier les infiltrations d'eau contrôlées par le système de drainage. Une diminution du débit peut s'expliquer par un collecteur cassé, un drain colmaté, une étanchéité qui s'améliore du fait de la retenue, une source qui serait tarie, détournée, captée... Il y a donc une incertitude sur l'effet de cet indicateur sur la performance de la fonction de drainage, en particulier pour une variation comprise entre 10 et 50 % par an.
Echelle et référence	Echelle de 0 (excellent) à 10 (inacceptable) 0 : débit sans évolution 1-2 : débit en diminution faible (<10%/an) 7-8 : débit en diminution forte et rapide (>50%/an) 10 : débit s'annule brutalement On ne donnera pas de note si la diminution est située entre 10 et 50 %
Caractéristique de lieu	Exutoire de drainage
Caractéristique de temps	Mesure menée une fois par semaine Evolution des mesures évaluée une fois par an

4 EVALUATION

La quantité de données impliquées dans des systèmes complexes peut être très importante. Les responsables en charge de leur contrôle tentent souvent d'obtenir une information plus synthétique pour l'évaluation du système par agrégation des données disponibles. Ces évaluations globales peuvent avoir comme objectifs le contrôle du système par propositions d'actions correctives, la détermination des points de fonctionnement optimaux, la classification d'un système par rapport à un autre par exemple pour la hiérarchisation des actions de maintenance…

Les paragraphes suivants décrivent des modèles d'agrégation en vue d'évaluer la qualité d'un produit (§ 4.1) et la sécurité d'un ouvrage de génie civil (§ 4.2).

4.1 Evaluation de la qualité des émulsions de viande

Au cours de la fabrication d'un produit alimentaire, il est essentiel de définir les conditions opératoires du procédé qui mènent, à la fin de l'opération, à l'obtention d'un produit aux caractéristiques sensorielles et technologiques souhaitées. Pour la fabrication des émulsions de viande, l'opération de cutterage consiste en un mélange et un broyage très fin des matières premières (viandes, glace, sel, épices et additifs). C'est l'opération critique de la fabrication vis-à-vis des propriétés sensorielles finales et du rendement à la cuisson : ces propriétés sont fortement liées aux conditions opératoires appliquées pendant le cutterage.

Quatre indicateurs sensoriels – Taille des particules de gras (TM), Fermeté de la mêlée (FE), Homogénéité de la taille des particules de gras (HT) et Collant (CO) – couplés à une mesure de température (TEMP) sont utilisés par l'opérateur pour évaluer globalement le produit en fin de cutterage. Nous avons formalisé ces différentes mesures et les avons combinées avec des règles SI-ALORS afin de représenter l'évaluation globale du produit réalisée, en fin de cutterage, par l'opérateur(Figure 4). L'évaluation globale est appelée Indice de Cutterage (IC). IC est évalué sur une échelle de 1 (faible degré de cutterage) à 5 (degré de cutterage excellent). En outre, un signe « - » ou « + » est associé à la valeur de IC : il exprime les deux termes couramment employés dans les pratiques industrielles de « sous-cutterage » (signe -) et « sur-cutterage » (signe +) [Girard, 1981]. La règle suivante est extraite de la base de règles :

SI TM est « petite » ET SI HT est « très bien homogénéisée » ET SI FE est « moyenne » ET SI CO est « moyen » ET SI TEMP est « normale » ALORS IC est égal à 5.

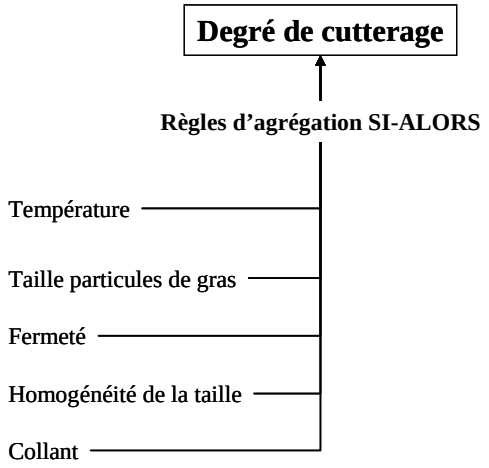

Figure 4. Modèle d'agrégation pour évaluer le degré de cutterage

Cette évaluation globale qui repose sur quatre données sensorielles pouvant être exprimées par l'homme directement dans l'atelier de fabrication, nous a permis par la suite d'utiliser des algorithmes d'optimisation (Simplex, Méthode des Surfaces de Réponse) afin de déterminer les conditions opératoires du procédé de cutterage qui mènent à l'obtention d'un produit aux propriétés sensorielles et technologiques recherchées [Curt et al., 2004a ; Curt et al., 2004b].

4.2 Evaluation de la sécurité

Un barrage est un système complexe comportant plusieurs composants en interaction. Deux niveaux d'évaluation ont été modélisés : la fiabilité des fonctions techniques (Fi) remplies par le barrage (étanchéité, drainage, résistance au glissement…) et la sécurité du barrage (μFM) vis-à-vis de différents modes de rupture (érosion interne du remblai, surverse, glissement de la fondation…). Ces évaluations permettent à l'expert de proposer le cas échéant des actions correctives : actions de maintenance (fauchage du talus aval), actions d'urgence (vidange de la retenue) ou actions de confortement (réalisation d'une risberme). La sécurité du barrage dépend de la fiabilité des différentes fonctions. La fiabilité de ces fonctions est évaluée à partir d'un ensemble d'indicateurs (Ii) de différentes natures : auscultés, visuels, calculés (cf. Figure 5).

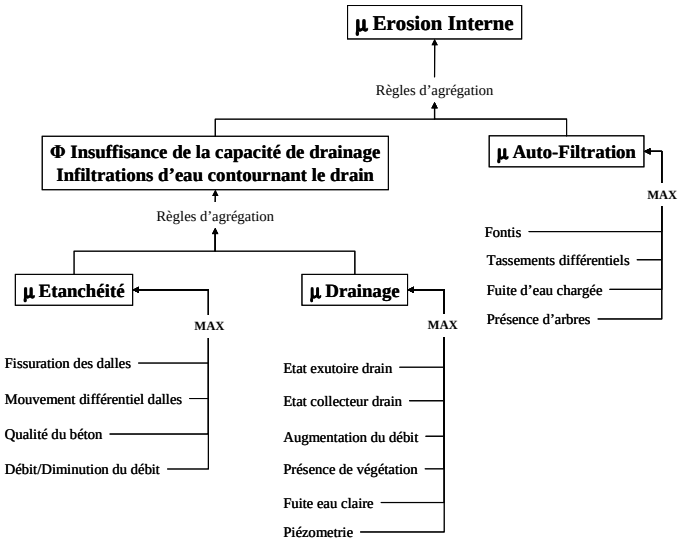

Figure 5. Exemple de modèle d'agrégation pour l'évaluation de la sécurité des barrages

Plus précisément, la fiabilité de la fonction (μFi) est évaluée en calculant le maximum des valeurs des (n-m+1) indicateurs (Ij) impliqués dans l'évaluation de la performance de la fonction et obtenue par

$$\mu F_i = \underset{j=m}{\overset{n}{\mathrm{MAX}}} [I_j] \qquad (1)$$

L'opérateur maximum a été proposé par les experts lors des séances car il représente bien leur mode d'agrégation des indicateurs en vue d'obtenir la fiabilité d'une fonction. L'utilisation systématique de cet opérateur pour le calcul de la performance de chaque fonction se justifie au point de vue mathématique par la définition d'une échelle de mesure unique pour tous les indicateurs. On considère que l'unité de mesure est la même quelque soit l'indicateur et on se place dans le cas le plus défavorable en utilisant le maximum.

A un niveau d'abstraction plus élevé, des règles combinant les résultats de fiabilité des fonctions ont été déclarées par les experts. Par exemple, la combinaison de μFEtanchéité et μFDrainage est menée selon les règles :

SI « Fuite d'eau claire » ≤2 ET « Piézométrie » ≤2 ET μFEtanchéité ≤ 2 ALORS φ1 = μFEtanchéité (2)
SI « Fuite d'eau claire » ≤2 ET « Piézométrie » ≤2 ET μFEtanchéité > 2 ALORS φ1 = μFDrainage(3)

avec « Fuite d'eau claire » et « Piézométrie » deux indicateurs et φ1, le phénomène d'insuffisance de la capacité de drainage (cf. Figure 5).

Ces règles d'agrégation permettent d'obtenir au final l'évaluation de la sécurité du barrage vis-à-vis d'un mode de rupture. Une dizaine de modes de rupture a été traitée de la sorte. A partir de cette évaluation, les experts peuvent émettre des recommandations d'actions.

4.3 Conclusion

Dans les deux cas traités, des données de nature différente ont été agrégées afin d'obtenir une évaluation globale du produit ou de l'ouvrage. Les agrégations sont rendues possibles par l'utilisation du formalisme des indicateurs. Ces évaluations globales peuvent constituer les entrées d'algorithmes de contrôle.

5 CONTROLE

Le contrôle d'un système vise à proposer des actions correctives afin de maintenir ce système dans des conditions de fonctionnement nominales et garantir par exemple, l'obtention de produits aux caractéristiques de qualité attendues ou le maintien de la sécurité d'un ouvrage.

Pour le cas de la maîtrise de la qualité de produits en cours de fabrication, la stratégie de contrôle vise à déterminer les actions à appliquer sur les paramètres du procédé (température d'un four, durée de pétrissage, hygrométrie en séchage…).

Nos travaux ont porté sur des procédés batch. Pour cette catégorie de procédés, quatre types de contrôle peuvent être distingués : l'utilisation d'une trajectoire prédéterminée sans aucun contrôle, l'utilisation d'une trajectoire prédéterminée associée à un contrôle en boucle ouverte, la mise en place de contrôleurs optimaux en boucle fermée et l'optimisation batch à batch. Dans nos travaux, nous avons développé des algorithmes de contrôle batch à batch, seuls ou en combinaison avec une approche feedback [Curt et al., 2007]. En effet, deux cas ont été rencontrés (Figure 6). Sur la figure, k est l'indice de batch, y_{ki} (p) $\in$ R^n sont les n variables de qualité du produit ($i \in [1,n]$) évalués à la fin de l'intervalle p, u_{kj} (p) $\in$ R^m sont les valeurs des m variables manipulées pendant l'intervalle p ($j \in [1,m]$), $\tilde{y}_{ki}(t)$ représente les caractéristiques attendues par l'opérateur au temps t du k-ième batch. Les deux cas rencontrés sont les suivants :

- l'évaluation du produit est retardée jusqu'à la fin de l'opération et le contrôle est réalisé seulement par une approche batch à batch. Les sorties du système de contrôle sont u(k+1)j(t),
- le produit est évalué plusieurs fois pendant le batch et le contrôle est réalisé en employant une approche batch à batch combinée avec une approche feedback : les sorties du modèle sont ukj(t+1) et u(k+1)j(.). Pour l'approche batch à batch, les actions peuvent être appliqués à différents temps.

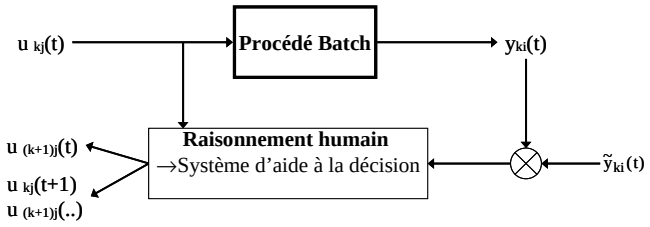

Figure 6. Contrôle d'un procédé type batch en utilisant un contrôle batch à batch et/ou un contrôle feedback

5.1 Contrôle de l'opération de cutterage

Le contrôleur développé est ici de type batch à batch. Il a pour but d'obtenir une mêlée à l'indice de cutterage compris entre 4,5 et 5. La variable d'entrée est l'indice de cutterage IC décrit précédemment et les variables de sortie sont :

- DnSP = SP(n+1) – SP(n) où SP(n+1) est la consigne de vitesse de rotation pour le (n+1)-ième batch et SP(n) la consigne de vitesse de rotation pour le n-ième batch ;
- DnDUR = DUR(n+1) – DUR(n) où DUR(n+1) est la consigne de durée de rotation pour le (n+1)-ième batch et DUR(n) est la consigne de durée de rotation pour le n-ième batch.

La base de règles est composée de 19 règles SI-ALORS (Tableau 4). Ces règles ont été recueillies auprès d'opérateurs de la fabrication. La conclusion de chaque règle est associée à un paramètre pour les deux sorties : DnSP et DnDUR. Par exemple, si IC est évalué à 3-, et si SP(n) est plus faible que 1500 tpm et DUR(n) est inférieur à 4 min, la règle associée signifie que DnDUR est augmentée de 2 min et DnSP est augmentée de 1500 tpm. Si DUR(n) est supérieur ou égal à 4 min, la règle associée signifie que DnSP est augmentée de 1500 tpm et DnDUR est maintenue constante pour le prochain batch.

5.2 Conclusion

Le contrôleur développé pour l'application sur le cutterage est de type batch à batch. Un contrôleur alliant les approches batch à batch et feedback a été implémenté pour l'opération d'étuvage du saucisson sec. Les entrées de ce contrôleur sont des indicateurs uniquement de nature sensorielle. Le développement de ces contrôleurs passe par la modélisation du comportement de l'opérateur face au procédé en réaction à des dérives constatées.

Tableau 4. Extrait de la base de règles pour le contrôle batch à batch utilisant la connaissance humaine

		Vitesse (tours/min - tpm)		
IC	**Durée (min)**	**<1500**	**1500-2500**	**>2500**
1- or 2-	<4	DnDUR = + 2 min et DnSP = + 2000 tpm	DnDUR = + 2 min et DnSP = + 1000 tpm	DnDUR = + 2 min
	≥4	DnSP = + 2000 tpm		
2+ or 1+	≥4		DnDUR = - 2min	DnDUR = - 2min et DnSP = - 500 tpm
3-	<4	DnDUR = + 2 min et DnSP = + 1500 tpm	DnDUR = + 2 min et DnSP = + 1000 tpm	DnDUR = + 2 min
	≥4	DnSP = + 1500 tpm	DnSP = + 1000 tpm	
3+	≥4		DnDUR = - 1 min	DnDUR = - 1 min et DnSP = - 500 tpm

6 CONCLUSION

Dans ce papier, les rôles que les Hommes peuvent jouer dans des systèmes complexes ont été soulignés notamment pour ce qui concerne la mesure, l'évaluation et le contrôle de ces systèmes. La prise en compte de ce rôle nous a amenés à développer des méthodologies de recueil, de formalisation et de modélisation adaptées au système étudié et à la finalité de la recherche. L'originalité de nos travaux tient au fait qu'ils reposent sur l'utilisation de données de natures diverses et notamment des mesures sensorielles réalisées par des experts ou des opérateurs en situation de travail. Une structure de formalisation a été proposée afin d'assurer la fiabilité de ces données. Les méthodes illustrées sur des applications au génie des procédés et au génie civil devraient pouvoir être appliquées à d'autres domaines où les Hommes jouent un rôle important dans la mesure, l'évaluation globale ou la décision. De même, les caractéristiques de qualité et de sécurité ont été étudiées mais d'autres caractéristiques devraient pouvoir être traitées.

Un point important qui n'a pas été présenté ici est la prise en compte des imperfections des données (incertitude, incomplétude, imprécision) : l'utilisation de la logique floue et de la théorie des possibilités nous a permis de représenter ces imperfections et de les propager dans les modèles d'agrégation afin de ne pas perdre une information intéressante et d'avoir une représentation de la réalité plus fidèle [Curt et al., 2004a ; Curt et al., 2004b ; Curt et al., 2007 ; Curt et al., 2004c ; Curt et al., 2008].

Les retombées potentielles de ces démarches peuvent se situer sur trois plans :

- le regroupement des connaissances. Ces recherches ont comme conséquence de structurer et regrouper des connaissances de différentes natures (mesures, inspections visuelles, raisonnement…) en un seul outil ; ceci devrait favoriser leur utilisation et leur diffusion ;
- l'homogénéisation des jugements. Les formalismes développés permettent d'aller vers une unification les notations des experts et donc vers des actions communes sur le système ;
- le management des connaissances c'est-à-dire leur capitalisation et leur transmission. La capitalisation des connaissances peut aider à pallier des départs à la retraite ou mutations mais également faciliter la formation d'ingénieurs débutants. En effet, cette capitalisation doit avoir comme objectif, à terme, la transmission de ces savoirs à des ingénieurs en formation. La transmission du savoir est un thème qui a été traité par plusieurs auteurs : la formalisation n'a en effet de sens que si l'acquis est capitalisé d'une manière qui permette de l'exploiter par la suite [Pomian, 1996]. Cette transmission permet une mise en commun du savoir qui est nommé par [Dieng et al., 1998] sous le terme de « socialisation » du savoir. Il s'agit de transformer une connaissance individuelle en une connaissance collective.

7 REFERENCES

AFNOR, (1994) Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie, 59 pages.

Curt, C., Trystram, G., Hossenlopp, J., (2001) Formalisation of at-line human evaluations to monitor product changes during processing. Integration of human decision in the dry sausage ripening process. *Sciences des Aliments*, 21, pp. 663-681.

Curt, C., Allais, I., Perrot, N., Leblanc, V., Trystram, G., (2004a) Optimisation of the meat emulsification process using at-line human evaluations and the Simplex method. *Journal of Food Engineering*, 64, pp. 33-41.

Curt, C., Francon, C., Trystram, G., (2004b) Optimisation of the chopping process using at-line human evaluations and Response Surface Methodology. *International Journal of food Science and Technology*, 39, pp. 1043-1052.

Curt, C., Perrot, N., Allais, I., Agioux, L., Ioannou, I., Edoura-Gaena, B., Trystram, G., Hossenlopp, J., (2004c). Formalization of at-line human evaluations to monitor product changes during processing: the concept of sensory indicators. *Intelligent Sensory Evaluation*. Springer, 157-174.

Curt, C., Peyras, L., Boissier, D., (2006) Méthode d'évaluation de la performance des barrages basée sur l'expertise. Application aux barrages en remblai. *LambdaMu15 - 15e Congrès de Maîtrise des Risques et de Sûreté de Fonctionnement*, Lille, France, 10-13/10/2006.

Curt, C., Hossenlopp, J., Trystram, G., (2007) Control of food batch processes based on human knowledge. *Journal of Food Engineering*, 79, pp. 1221-1232.

Curt, C., Talon, A., Mauris, G., (2008) Using physical measurements, sensory evaluations and expert judgments in a dam assessment support system. *12th IMEKO TC1 & TC7 Joint Symposium on Man Science & Measurement*, Annecy, France, 03-05/09/2008.

Dieng, R., Corby, O., Giboin, A., Ribière, M., (1998) Methods and tools for corporate Knowledge Management, INRIA.

Girard, J. P., (1981) Contribution à l'étude de la technologie des pâtes fines. *Sciences des Aliments*, 1, pp. 315-327.

Grundstein, M., Barthès, J. P. A., (1996) An industrial view of the process of capitalizing knowledge. *ISMICK 4*, RotterdamErlong Verlag, 21-22/10/1996.

Pomian, J., (1996) Mémoire d'entreprise - techniques et outils de la gestion du savoir. Les Editions Sapientia. 233 pages.

Trystram, G., Courtois F., (1998) Automatique et industries alimentaires - quelques avancées, perspectives et limites. *I.A.A.*, pp. 21-32.