



Amélioration de la qualité d'un process industriel

I. Le besoin

Un process industriel (par exemple la fabrication d'une pièce métallique complexe) dépend évidemment d'un très grand nombre de paramètres : les compositions chimiques des entrées, les températures et les pressions tout au long de la chaîne de fabrication, les divers réglages, etc.

L'Industriel peut être insatisfait de la qualité, principalement dans deux situations :

- Il respecte toutes les spécifications ; pourtant, un taux de rejet excessif apparaît en fin de process. Une proportion importante des pièces (40% ou davantage) ne passe pas les contrôles de qualité imposés avant la livraison au client. Dans ces conditions, le coût de fabrication est très important.
- La qualité est bonne, supérieure aux seuils voulus, mais inégale. L'Industriel voudrait que le process soit toujours "bon", et cesse d'osciller entre "bon", "très bon", "excellent", etc. En effet, ces oscillations semblent indiquer que l'Industriel ne maîtrise pas convenablement son process.

II. L'apport des méthodes probabilistes

A. Pourquoi les méthodes probabilistes ?

Rien ne dépend jamais du hasard, et certainement pas un process industriel, mais on a le droit de "faire comme si" et de considérer que l'influence de chaque paramètre (par exemple une température) sur la variable de sortie (par exemple une résistance élastique) est régie par une loi de probabilité, que l'on ne connaît pas et qu'il va falloir établir. On ne recherche pas les causes intimes du phénomène : la plupart du temps, elles dépendent de lois physiques mal connues. On se contente de traiter les données disponibles pour mettre cette loi de probabilité en évidence. C'est une approche orientée "data" et non "physique", qui a deux caractéristiques principales :

- Elle est simple et rapide à mettre en œuvre ;
- Elle est compatible avec toutes les informations "métier" dont on peut disposer.

Les méthodes probabilistes sont "robustes" en ce sens qu'elles prennent en compte, dès le début, les incertitudes sur les données et sur les lois. Voir notre livre [MPPR] pour une description plus complète.

B. Etape préliminaire

Pour chacun des paramètres qui interviennent, nous déterminons sa loi de probabilité. Cela revient simplement à constituer un histogramme. On découpe les valeurs possibles en tranches et on compte combien de fois chaque tranche apparaît. Cette étape préliminaire permet aussi de détecter les données manquantes et les valeurs aberrantes et, au besoin, de les corriger ou de les reconstruire : voir notre fiche "qualité des données" et nos livres [RDM] et [PIT].

C. La hiérarchisation des paramètres

C'est la première question qui intéresse l'Industriel : parmi tous les paramètres qui interviennent, quels sont ceux qui influent le plus sur la qualité en sortie ? Nos méthodes permettent cette hiérarchisation, quel que soit le nombre des données. Techniquement, on fabrique, pour chaque paramètre, deux lois de probabilité conditionnelle pour la variable de sortie : dans le cas où le paramètre est inférieur à la médiane et dans le cas où il est supérieur, et on calcule la différence des deux. Les nombres ainsi obtenus permettent la hiérarchisation. Voir le livre [NMP], chapitre III, pour une description détaillée de la méthode.

D. Recherche de réglages satisfaisants

C'est la seconde question qui intéresse l'Industriel. En général, il dispose d'un "réglage optimal", qui pose problème. Nos méthodes permettent, pour chaque paramètre intervenant dans le process, de définir un "intervalle de confiance" (tout un intervalle, et non pas une simple valeur), qui permet d'assurer un bon réglage.

Cette notion d'intervalle de confiance est souvent nécessaire pour répondre aux Autorités de Sécurité, qui s'inquiètent de la prise en compte des incertitudes.

A l'inverse, la méthode permet aussi la mise en évidence des configurations de paramètres qui conduiront à une "situation à risque" pour la variable de sortie du process, par exemple une qualité inférieure à un seuil fixé.

Toutes ces conclusions sont obtenues uniquement à partir des informations recueillies, et sans introduire d'hypothèse factice. Bien des méthodes utilisées dans les outils du commerce font des hypothèses implicites : les process sont linéaires, les lois sont gaussiennes, etc. Tout ceci est évidemment faux en pratique et inacceptable pour les Autorités.

Nos méthodes reposent exclusivement sur des outils mathématiques avérés, vérifiés, publiés ; ce ne sont pas des "boîtes noires". Elles peuvent en particulier être utilisées pour une démonstration de sûreté, à la demande des Autorités, ce que ne permet certainement pas l'utilisation aveugle d'un logiciel.

Enfin, les mathématiques sont non brevetables : l'Industriel peut faire ce qu'il veut de la méthode que nous développons pour lui, y compris évidemment l'incorporer à sa propre informatique. Il n'existe pas de licence logicielle sur les outils que nous réalisons.

E. Amélioration des mesures

Les méthodes probabilistes permettent l'amélioration des mesures, grâce à des "tables de calibration" appropriées ; ce sont des tables de probabilités conditionnelles. Sachant qu'un capteur indique tant, voici la probabilité que l'erreur soit de tant. Ces lois sont différentes d'un bout à l'autre de la gamme de mesure : un capteur n'a pas partout la même précision (cela s'appelle le facteur d'échelle). Nous avons employé ces méthodes d'abord dans le cadre de contrats avec la Délégation Générale pour l'Armement (Service des Programmes de Missiles Tactiques), puis avec l'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire, depuis 2003 : amélioration des mesures de matières nucléaires, et en 2012-2014 avec l'IFSTTAR : amélioration du positionnement GPS en environnement urbain.

F. Différences avec les statistiques

Les statistiques permettent de multiples traitements des données : ajustements, régressions, tests, mais toujours en faisant des hypothèses sur les lois des échantillons recueillis. Or, dans les situations où nous travaillons, ces lois ne sont pas connues et introduire

des lois factices est tout aussi inacceptable qu'introduire des données factices. Les méthodes probabilistes n'ont pas ce handicap, puisque notre travail est tout d'abord de constituer la loi de probabilité à partir des données existantes.

On peut dire grossièrement que les statistiques sont une forme raffinée des probabilités (lorsque la loi est connue) et que les probabilités sont une forme préliminaire des statistiques (avant que la loi soit connue).

III. La variabilité des process

Tous les Industriels cherchent à faire en sorte que leurs process soient constants, contrôlés, normalisés. Néanmoins, qu'on le veuille ou non, les lois de la Nature imposent des variations : les éléments en entrée ne sont jamais aussi constants qu'on le voudrait. Dans ces conditions, l'Industriel a tout intérêt à investiguer le résultat de ces variations, même s'il souhaite les éliminer. Cela se fait en deux temps :

- Déterminer quelles sont les variables d'entrée qui influent le plus sur la qualité en sortie (hiérarchisation de paramètres) ;
- Etablir un plan d'expériences pour analyser les conséquences des variations sur les paramètres prépondérants.

La conséquence de cette étude est une bien meilleure connaissance de la "robustesse" du process ; cette analyse peut, dans certains cas, être demandée par les Autorités de Sécurité.

IV. Nos réalisations

Livres :

1. [MPPR] Bernard Beauzamy : Méthodes probabilistes pour l'étude des phénomènes réels, ISBN : 2-9521458-0-6, Editions de la SCM, mars 2004 ; seconde édition, juin 2016.
2. [RDM] Bernard Beauzamy et Olga Zeydina : Méthodes probabilistes pour la reconstruction de données manquantes, ISBN : 2-9521458-2-2, Editions de la SCM, avril 2007.
3. [NMP] Bernard Beauzamy : Nouvelles méthodes probabilistes pour l'évaluation des risques. ISBN : 978-2-9521458-4-8, ISSN : 1767-1175, Editions de la SCM, avril 2010.
4. [PIT] Olga Zeydina et Bernard Beauzamy : Probabilistic Information Transfer. ISBN: 978-2-9521458-6-2, ISSN: 1767-1175. Editions de la SCM, mai 2013.

Références récentes :

- 2003-2007, IRSN : Amélioration de la prise en compte des mesures d'enrichissement de l'Uranium et du Plutonium par des méthodes probabilistes de fusion de données.
- 2005, EdF R&D : Gestion probabiliste de la production à horizon 8 jours.
- 2005-2006, Veolia Environnement : Méthodes probabilistes pour la caractérisation des pénuries d'eau en Vendée et le dimensionnement des ouvrages d'art correspondants.
- 2005-2006, Veolia Transport (Connex) : Méthodes probabilistes pour le dimensionnement de réseaux de transports collectifs.
- 2006-2015, Agence Européenne pour l'Environnement : Contrat cadre "méthodes probabilistes pour la qualité de l'eau en Europe".
- 2006-2009, IRSN : Méthodes probabilistes pour la Sécurité Nucléaire : mise en place de la méthode de l'Hypersurface Probabiliste (méthode créée par la SCM).
- 2006, Observatoire de l'Energie, DGEMP : Etude probabiliste concernant la sécurité des approvisionnements en gaz pour la France.
- 2007-2012, Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA) : Analyse probabiliste des modèles de transferts de radionucléides.
- 2007-2008, Délégation à la Sécurité Nucléaire et à la radioprotection pour les activités et installations intéressant la Défense (DSND) : Calculs de sûreté pour les systèmes d'armes nucléaires.
- 2008, Agence de l'Eau Artois-Picardie : Etude probabiliste concernant la qualité des eaux de rivière et caractérisation des situations de bonne qualité.
- 2008, Réseau de Transport d'Electricité : Méthodologie probabiliste relative à une décision d'investissement.
- 2009-2010, SNECMA Propulsion Solide : Méthodes probabilistes pour l'amélioration de la fiabilité des composants.
- 2010, 2012, 2014, 2015, 2016, 2017, Nuclear Energy Agency (OCDE) : Détection de données aberrantes dans les bases de données.
- 2011-2012, ArcelorMittal : Méthodes probabilistes pour l'amélioration de la qualité d'un usinage.
- 2011, Air Liquide : Hiérarchisation de paramètres et construction d'un "indice de proximité" entre pipelines.
- 2013, Areva : Hiérarchisation des paramètres intervenant dans un process industriel.
- 2013, DCNS, site d'Indret : Soudage par Faisceau d'Electrons ; hiérarchisation de l'influence des paramètres par analyse probabiliste.
- 2013, Coop de France déshydratation : Réalisation d'un outil d'analyse des Composés Organiques Volatils Non Méthaniques.
- 2015, Solétanche-Bachy : Hiérarchisation des paramètres influant sur la déformation d'un ouvrage d'art.
- 2016, 2017, COSEA : Etude probabiliste relative à la turbidité de l'eau.
- 2017, Syndicat des Eaux d'Île de France : Outils mathématiques pour l'analyse du réseau.