



Dysfonctionnements d'équipements :

- surveillance des systèmes industriels
 - détection des anomalies et défauts
 - organisation des plans d'inspection
 - réparation des pannes
 - gestion des dysfonctionnements
 - maintenance préventive et prédictive

Notre programme de travail

Mise à jour : février 2023

Résumé Opérationnel

Le programme a pour but d'apporter aux entreprises des outils permettant de :

- surveiller les divers systèmes industriels pour en contrôler le bon fonctionnement ;
- s'assurer que la détection d'anomalies et de défauts éventuels est bien faite ;
- décider des plans d'inspection relatifs aux divers équipements ;
- organiser les réparations ;
- planifier les maintenances préventives et prédictives.

Il faut d'abord s'assurer que l'information reçue est fiable (panne ou fausse alarme ?) et ensuite que l'on dispose, sur l'ensemble des équipements, des données qui sont nécessaires (caractéristiques de pose, d'exploitation, date de mise en service, etc.).

L'objectif final du programme est de fournir aux entreprises tous les éléments nécessaires pour que l'outil industriel fonctionne correctement.

I. Présentation du besoin

Les entreprises cherchent à utiliser au mieux les ressources dont elles disposent, pour satisfaire les besoins de leur clientèle : respecter les délais, la qualité de service, etc. Elles affectent donc des budgets importants à ce qu'elles appellent "optimisation des ressources". Celle-ci, parfaite en théorie, fonctionne souvent très mal en pratique, parce que la Nature s'en mêle, avec diverses facéties : les camions sont en panne, l'informatique est bloquée, les routes sont coupées par une inondation, la demande est plus forte/plus faible que prévu, le matériel est défectueux, etc.

Une règle assez simple se dégage : plus votre optimisation sera poussée en théorie, plus elle sera fragile en pratique ! Les difficultés doivent être prises en compte dès la conception.

La première chose à faire, pour exploiter convenablement les ressources, est de s'interroger sur la qualité et la pertinence des données dont on dispose. C'est du bon sens, mais ce bon sens-là n'est pas aussi partagé qu'on le souhaiterait.

Beaucoup d'entreprises ont une approche doublement erronée :

- Nos données anciennes sont sans aucune valeur : mal enregistrées, périmées, etc. ;
- Nos données récentes sont impeccables ; nous mesurons tout, partout, tout le temps.

Notre expérience est, au contraire, que les données anciennes, même grossières, contiennent toujours des informations exploitables et que les données modernes sont loin d'être irréprochables !

Pour les données modernes, le premier travail concerne l'analyse des capacités des capteurs (un capteur est, par définition, un appareil susceptible de recevoir une information). Ensuite, on s'interrogera sur le bon fonctionnement des équipements.

II. Les capteurs

1. Le recueil de l'information

L'information recueillie, pour la surveillance d'un système, provient généralement d'un ou de plusieurs capteurs. Il peut s'agir de la mesure d'une température, du passage de véhicules, d'un taux de radioactivité, etc. Avant de prendre une décision, avant d'agir sur le système proprement dit, il faut d'abord se demander si l'information recueillie est correcte ou non et si elle est suffisante.

C'est particulièrement évident si le système est supposé être "autonome" (comme un véhicule sans conducteur), parce que ses décisions dépendent directement des perceptions recueillies par les capteurs. De nos jours, on tend au développement de systèmes automatiques, connectés, qui reçoivent et exploitent en permanence une information toujours plus complexe.

2. Les dysfonctionnements

Il y a quatre sortes de dysfonctionnements :

- La panne : le capteur n'indique plus rien ;
- Les trous dans l'information : certaines plages d'information sont manquantes ;
- Une incertitude excessive : la précision est dégradée et l'information est peu utilisable ;
- La fausse alarme : le capteur indique des situations qui ne correspondent pas à la réalité.

La fausse alarme est rarement prise en compte comme elle le devrait. L'analyse du réseau TELERAY (surveillance de la radioactivité dans l'environnement), que nous avons réalisée pour l'IRSN (2013 à 2015), a montré un taux excessif de fausses alarmes, qui "pénalise" le réseau ; plus il y aura de balises et plus il y aura de fausses alarmes. A la limite, un réseau trop dense risque de perdre toute crédibilité même si, à l'inverse, la redondance est indispensable à la robustesse.

3. Comment valider l'information ?

C'est en général possible, en comparant entre elles les indications fournies par divers capteurs, ou bien en faisant le suivi d'un même capteur. On peut le faire de manière statistique, avec retard : par exemple, au bout d'une année, on compare les enregistrements et on constate que telle station n'a pas fonctionné correctement. On peut le faire en temps réel, pourvu que les capteurs soient suffisamment proches les uns des autres et qu'il y ait des recouvrements dans les zones de surveillance : il faut que le réseau ait été construit pour cela.

Nous avons conçu des méthodes de détection des données aberrantes et des méthodes de reconstruction des données manquantes ; voir nos livres [RDM] et [PIT] et notre fiche de compétences "Qualité de l'information" : [SCM_QI].

4. Comment concevoir le réseau de capteurs pour qu'il soit robuste ?

C'est évidemment une préoccupation qu'il faut avoir avant la mise en place. Elle signifie que le dysfonctionnement de chaque capteur pourra être détecté et analysé. Comme nous l'avons dit plus haut, la densification des capteurs n'est pas une bonne solution, à cause des fausses alarmes, qui, dans les situations critiques (incendies, radioactivité), obligent à de nombreuses vérifications. Il vaut mieux disposer de capteurs plus frustes et moins sensibles. La question de la dépendance des capteurs doit également être posée : peuvent-ils tomber en panne pour la même cause ?

De manière générale, un réseau utilisant plusieurs capteurs frustes et indépendants sera plus robuste et finalement plus précis qu'un capteur unique supposé plus moderne et plus fiable. C'est aussi la raison pour laquelle les données anciennes, utilisant des capteurs robustes, restent généralement exploitables. Voir notre livre [MPPR] (seconde édition, chapitre 13 : fusion multi-capteurs) à ce sujet.

Il faut se méfier des arguments "technologiques" des vendeurs, qui présentent tout nouveau matériel comme ultra-fiable et ultra-performant : il faut leur demander leurs références sur une longue période. Pour un réseau dont le bon fonctionnement est vital (ex. : la signalisation des trains), il faut faire appel à des technologies éprouvées. Ajoutons que tout ce qui relève de l'informatique est suspect par principe, parce que cette discipline change très souvent la conception de ses matériels.

L'Industriel devrait demander au prestataire qui installe le réseau de capteurs de garantir celui-ci sur une longue période (au moins dix ans), y compris les vérifications et calibrations annuelles, nécessaires en particulier durant la période de rodage. Il ne s'agit plus de vendre du matériel, mais un service, qui doit être impeccable et assuré sur une longue durée.

Le prestataire qui installe les capteurs devrait avoir accès à l'information relative à ce réseau : quelles ont été les pannes, les dysfonctionnements, les maintenances. C'est lui, en définitive, qui est responsable et il faut prévoir des échanges contractuels, par exemple tous les trois mois, avec l'industriel exploitant.

Dans bien des cas, il sera préférable de faire appel à un prestataire externe, qui viendra faire des mesures de temps en temps, plutôt que d'installer un réseau fixe qui ne fonctionnera pas correctement : c'est la conclusion de nos travaux pour l'Andra en 2019.

5. Optimiser le réseau de capteurs

Il est légitime de vouloir "optimiser" un réseau de capteurs : pas de manques, pas de redondances. Mais ceci doit être le résultat d'une étude approfondie : y a-t-il des portions du territoire non couvertes ? A l'inverse, a-t-on le sentiment que certains capteurs sont redondants ? C'est le cas si les données qu'ils fournissent peuvent toujours être reconstruites à partir des capteurs voisins, tenant compte des éventuelles pannes de ceux-ci. Mais un système redondant est évidemment plus robuste aux pannes : la redondance est la clef de la robustesse.

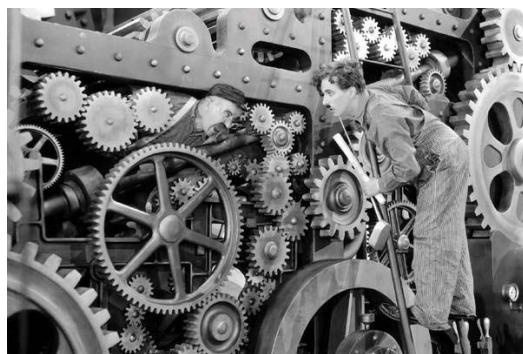
III. Les équipements

1. Les dysfonctionnements

Il se peut qu'un équipement soit tributaire d'une information qu'il est supposé recevoir (comme une signalisation, pour un train). Un tel équipement peut présenter des dysfonctionnements pour deux raisons principales :

- Il ne reçoit pas l'information convenable ;
- Il ne réagit pas correctement à l'information reçue.

Il faut donc disposer de tests permettant séparément l'étude des deux situations.



Dans beaucoup de cas, l'équipement est purement passif (canalisations diverses, lignes électriques, rails, etc.). Le "Programme d'Investigation Dynamique", que nous avons mis en œuvre pour Air Liquide en 2011, permet la vérification de tels équipements.

2. Programme d'Investigation Dynamique

Considérons le cas particulier d'équipements très nombreux, de caractéristiques variées, répartis sur un large territoire : les canalisations d'eau, de gaz, les équipements comme les transformateurs, les signalisations des trains, les rails, etc. La préoccupation de l'exploitant est, pour un budget donné, de réduire les pannes futures.

Le "Programme d'Investigation Dynamique" répond à ce besoin. Prenons l'exemple des canalisations. L'exploitant dispose généralement d'un grand nombre d'informations (âge de la canalisation, type de fluide transporté, diamètre, longueur, profondeur d'enfouissement, nom du prestataire qui l'a posée, etc.), plus ou moins correctement recensées.

A chaque fois qu'une inspection est faite (et en particulier lorsqu'une canalisation est défectueuse), à chaque fois que des travaux sont réalisés, une note entre 0 et 10 est affectée à la canalisation concernée (0 : très mauvais état, 10 : parfait). On définit alors un plan d'inspection, qui consiste à analyser en priorité les canalisations dont les notes sont les plus basses, et toutes celles qui sont semblables à celles-ci, du point de vue des critères enregistrés (même année de pose, même diamètre, même usage, etc.). En langage imagé, on s'attend à ce que toutes les canalisations du même type soient des candidats plausibles à la mauvaise qualité.

Une fois ces canalisations inspectées, on leur attribue une note, qui est réinjectée dans le plan d'inspection. Il se peut par exemple que tel ensemble de canalisations, que l'on aurait cru globalement défectueux, ne présente en réalité que de rares défauts. Nous corrigeons donc notre opinion préalable quant à la mauvaise qualité d'une population particulière.

Les bases de données, même enrichies par le retour d'expérience, peuvent être insuffisantes et lacunaires (par exemple si l'on fait toujours les mesures là où elles ne servent à rien). Il faut valider et au besoin corriger le plan d'inspection.

A chaque instant, le PID donne à l'exploitant une liste, constamment remise à jour, qui peut se résumer ainsi : compte-tenu de toute l'information disponible, voici les inspections que nous estimons prioritaires.

Cette connaissance, toujours actualisée, de l'état de son patrimoine est essentielle pour l'exploitant, au-delà du plan d'inspection : elle lui permettra par exemple de justifier les besoins financiers pour les années suivantes.

Le PID relève de la gestion du patrimoine ("asset management"), au sens où l'entendent les entreprises : on attribue en effet une valeur économique à un ensemble de canalisations, de rails, de lignes électriques, etc. Ceci est légitime, parce que ce patrimoine, qui doit être entretenu, peut être vendu à un autre exploitant.

3. Prévoir les conséquences des dysfonctionnements

En cas de dysfonctionnement, le système va fonctionner "en mode dégradé" : il faut savoir anticiper les conséquences : quelle fraction de l'activité pourra-t-on assurer, et combien de temps prendra le retour à la normale ? Peut-on, par des procédures appropriées, minimiser l'impact des pannes ?

Ici encore, l'analyse d'un historique permet de se faire une idée des conséquences des pannes éventuelles et de prévoir des remèdes. Le réseau électrique HT étant "maillé", RTE parvient presque toujours à assurer la continuité de service, même en cas de rupture d'une ligne. De la même façon, la SNCF sait organiser un "contournement" si un train se trouve immobilisé en pleine voie. La SCM a contribué à l'organisation des plans de secours en cas d'intempéries, pour le Ministère de l'Intérieur, Secrétariat Général pour l'Administration, en 2016-2018. Les conséquences des pannes sont généralement faciles à anticiper ; la probabilité de survenance l'est beaucoup moins, surtout si l'historique est pauvre et que l'on travaille "à dire d'expert".

4. Simulations

La plupart des organismes, entreprises, institutions, disposent de simulateurs pour analyser le fonctionnement des systèmes complexes, mais ils sont rarement correctement équipés pour prendre en compte toutes les anomalies (pannes, incertitudes, fausses alarmes) qui peuvent affecter les différents capteurs et équipements. Notre programme de travail vise donc à compléter les simulateurs pour qu'ils puissent incorporer toutes ces difficultés. Il a été lancé lors d'une collaboration avec l'IRSN en 2014.

Un second élément fondamental est la présence de l'homme dans la boucle. Dans certains cas, les capteurs sont là pour fournir une information, et c'est l'homme qui prend la décision. Dans d'autres cas, on considère que l'homme est peu fiable (en particulier, il peut répondre trop tôt ou trop tard, avec un risque d'amplification des problèmes) et que, en dernier ressort, un système automatisé doit prendre les décisions. Notre rôle ici est de simuler les deux modes de fonctionnement, pour que l'on puisse analyser convenablement les avantages et les inconvénients dans chaque cas.

5. Maintenance préventive, maintenance prédictive

A partir d'un historique portant sur les équipements (date de pose, dates des inspections, des principales interventions), on peut définir correctement une maintenance préventive. On commence par évaluer une durée de vie pour chaque équipement ; elle dépend en général de nombreux facteurs, comme l'exposition aux intempéries et les conditions d'utilisation. Ensuite, on décide d'une intervention (inspection ou remplacement) peu avant l'expiration présumée de cette durée de vie. C'est en particulier ce que nous avons fait pour RTE en 2018 : définition des maintenances préventives pour les "sectionneurs". Ceci se fait sur critères probabilistes, et requiert l'existence d'un historique.

La maintenance prédictive requerra un dispositif d'alerte ; il faut des "Early Warning Signals" qui disent, par exemple, que telle température est excessive ou tel courant est trop fort. Mais on retombe alors sur les difficultés évoquées précédemment : il faut que les capteurs qui sont à l'origine de ces signaux faibles soient eux-mêmes fiables. Ce type de maintenance requiert donc d'analyser des données nombreuses, souvent hétérogènes et peu fiables.

IV. Recommandations aux entreprises

Nous recommandons aux entreprises de garder trace des caractéristiques des équipements qu'elles installent, sous une forme exploitable. Ces caractéristiques existent évidemment au moment de l'installation, mais si elles ne sont conservées que sous la forme d'un bon de commande jauni en bas d'une armoire, cela pose des problèmes de mise en œuvre pratique le jour où on en a besoin.

Il faut se dire que tous les équipements présenteront des dysfonctionnements un jour ou l'autre (cela fait partie des lois de la Nature) et qu'il faut disposer de l'information nécessaire pour les anticiper ou pour y remédier. De même, il faut conserver une trace exploitable de toutes les interventions qui sont faites (par exemple le remplacement de certaines pièces).

Nous recommandons aux entreprises de conserver un lien contractuel avec le fabricant de capteurs : il doit savoir quels dysfonctionnements ont été observés et pourquoi.

V. Nos publications

1. Livres

[MPPR] Bernard Beauzamy : Méthodes Probabilistes pour l'étude des phénomènes réels. SCM SA, ISBN 2-9521458-0-6, ISSN 1767-1175, mars 2004 ; seconde édition, juin 2016.

[RDM] Bernard Beauzamy et Olga Zeydina : Méthodes probabilistes pour la reconstruction de données manquantes. SCM SA, ISBN : 2-9521458-2-2, ISSN : 1767 – 1175, avril 2007.

[PIT] Olga Zeydina et Bernard Beauzamy : Probabilistic Information Transfer. SCM SA. ISBN : 978-2-9521458-6-2, ISSN : 1767-1175, mai 2013.

[IEPE] Bernard Beauzamy : Introduction à l'Etude des Probabilités Expérimentales, SCM SA, ISBN : 979-10-95773-02-3. ISSN : 1767-1175, janvier 2023.

2. Articles

[1] Emmeric Dupont (NEA), Bernard Beauzamy (SCM), Hélène Bickert (SCM), M. Bossant (NEA), Carmen Rodriguez (SCM), N. Soppera (NEA) : Statistical Methods for the verification of databases. Publication de la Nuclear Energy Agency de l'OCDE, 2011.

<http://www.oecd-nea.org/nea-news/2011/29-1/29-1-int-e.pdf#page=32>

[2] O. Zeydina (SCM), A.J. Koning (NEA), N. Soppera (NEA), D. Raffanel (SCM), M. Bossant (NEA), E. Dupont (NEA), and B. Beauzamy (SCM): Cross-checking of large evaluated and experimental databases, Science Direct, Nuclear Data Sheets 120 (2014) 277–280.

http://www.scmsa.eu/archives/NEA_SCM_2014.pdf

[3] Emmeric Dupont (NEA) : Exfor : Improving the quality of International Databases. NEA News, 2014, 32.1, page 28.

http://www.scmsa.eu/archives/EXFOR_NEA_News_2014_32.pdf

- [4] V. Khalipova (SCM), G. Damart (SCM), B. Beauzamy (SCM), G. B. Bruna (IRSN) : Malfunctions in radioactivity sensor's network. ANIMMA 2017 Proceedings.
- [5] Gottfried Berton (SCM) : Verification of the databases EXFOR and ENDF. Nuclear Energy Agency, JEFF Meetings - Session JEFF Experiments, November 28 - December 1, 2016.
http://www.scmsa.eu/archives/SCM_NEA_JEFF_Meeting_2016_11.pdf
- [6] (2017) Guillaume Damart (SCM), présentation lors de la conférence ANIMMA (Advancements in Nuclear Instrumentation Measurement Methods and their Applications), à Liège (Belgique) : dysfonctionnements dans les réseaux de capteurs (article en collaboration avec l'IRSN). http://www.scmsa.eu/archives/SCM_ANIMMA_Presentation_2017_06_21.pdf
- [7] (2017) Gottfried Berton, SCM SA, and Oscar Cabellos, NEA : Checking the resolved resonance region in EXFOR database JEFF Meetings - Session JEFF Experiments. November 20 - 24, 2017, Boulogne-Billancourt, France

3. Fiches de compétences associées

[SCM_QI] La Qualité de l'Information : fiche de compétence de la SCM
http://www.scmsa.eu/fiches/SCM_Qualite_Information.pdf

[SCM_MR] Méthodes robustes : fiche de compétences de la SCM
http://scmsa.eu/fiches/SCM_methodes_robustes.pdf

[SCM_Risques] Evaluation des risques : fiche de compétences de la SCM
http://scmsa.eu/fiches/SCM_Risques.pdf

VI. Colloques organisés par la SCM

- Les dysfonctionnements dans les réseaux de capteurs. Colloque organisé par l'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire et la SCM, novembre 2015.
http://scmsa.eu/archives/IRSN_SCM_CLQ_2015_11.pdf
- Dysfonctionnement d'équipements : Maintenance préventive. Colloque organisé par la SCM, novembre 2018.
http://www.scmsa.eu/archives/SCM_CLQ_2018_11.pdf

VII. Contrats récents

De manière générale, pratiquement tous les contrats traités par la SCM depuis 1995 ont mis en évidence des anomalies dans l'information disponible, résultant souvent de dysfonctionnements dans l'acquisition de cette information. Nous extrayons les plus récents.

- Agence Européenne de l'Environnement, 2006-2013 : Méthodes probabilistes pour la qualité de l'eau
- Veolia Environnement, Région Ouest, 2007 : Détection de dysfonctionnements dans les réseaux de capteurs
- Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire, 2007-2011 : Applications de l'Hypersurface Probabiliste aux problèmes de sûreté des réacteurs nucléaires

- International Stainless Steel Forum, 2008 : Analyse générale du système d'information et préconisations relatives au traitement statistique des données
- Areva, 2010 : Méthodes probabilistes pour l'étude d'un stockage de déchets radioactifs
- Nuclear Energy Agency (OCDE), 2010-2012 et 2014, 2015, 2016, 2017 : Détection de données aberrantes dans les bases de données
- Air Liquide, 2011 : Construction d'un "indice de proximité" entre pipe-lines
- ArcelorMittal, 2011-2012: Méthodes probabilistes pour la hiérarchisation des paramètres dans un process industriel
- IFSTTAR, 2011-2015 : Amélioration du positionnement GPS en situation urbaine
- GDF-SUEZ, 2012-2013 : Analyse générale de la qualité des données, distribution du gaz
- Areva, 2012-2013 : Analyse des incertitudes dans un process industriel
- IRSN, 2012 : Analyse statistique préliminaire de données de radioactivité dans l'environnement
- DCNS, 2013 : Méthodes probabilistes pour l'amélioration d'un procédé de soudage
- RFF, 2013 : Amélioration de l'outil de mesure de criticité des lignes Transilien
- COSEA (Ligne à Grande Vitesse Sud Europe Atlantique), 2013 : Estimation de la durée de retour de crues extrêmes
- IRSN, 2013, 2014, 2015 : Analyse du fonctionnement du réseau TELERAY : surveillance de la radioactivité ambiante
- IRSN, 2014 : Analyse du "risque résiduel" en sûreté nucléaire
- IRSN, 2014-2015 : Outil d'aide à la vérification des comptes de matière nucléaire
- EDF/SEPTEN, 2015 : Prise en compte des incertitudes dans les Etudes Probabilistes de Sûreté
- IRSN, 2015-2016 : Dysfonctionnements dans les réseaux de capteurs
- Société TELCAP, 2015 : Dysfonctionnements de balises dans les réseaux de télécommunications
- RATP, 2016 : Planning de remplacement d'équipements critiques
- ANDRA, 2016 et 2017-2018-2019 : Méthode d'optimisation du placement de capteurs dans un site de stockage de déchets radioactifs
- Taxis G7, 2016 : Etude d'un dispositif destiné à corriger les erreurs d'adresse
- Syndicat des Eaux d'Ile de France, 2017 : Appui méthodologique à l'analyse du réseau
- RATP, 2016-2018 : Modélisation du comportement des trains en situation de freinage d'urgence
- RATP, 2017 : Réalisation d'un outil de simulation des temps d'acheminement des trains de travaux, tenant compte de pannes d'équipements
- RTE, 2017-2018 : Analyse critique de la politique de remplacement des "sectionneurs"
- Atlandes (autoroute A63), 2018 : Analyse critique des compteurs de véhicules sur les bretelles de sortie
- Transporteur, 2019 : Analyses statistiques des données de position émises par des containers
- Groupe Atlantic, 2019 : Analyse probabiliste des appels au Service Après-Vente
- Société Coldway, 2020 : Rédaction d'une "Démonstration Générale de Sûreté"
- Framatome, 2020 : Rédaction d'une démonstration de sûreté pour une carte de contrôle commande
- Air Liquide, 2021 : analyse de la durée de vie de certains équipements
- Eiffage Rail, 2021 : Outils pour l'analyse de la fiabilité des équipements

- SNCF : Analyse critique des démonstrations de sûreté relatives à la pile à combustible (hydrogène)
- Teréga, 2021 : Méthodes probabilistes pour la vérification de l'intégrité des canalisations
- Bouygues Energies & Services, 2022 : Appui méthodologique à la conception d'un système d'information "Dysfonctionnements et Maintenances"