

Livre Blanc Maintenance Prédictive

Révolution ou évolution ?



Février 2023

Sommaire

Édito 05

01	Quels sont les différents types de maintenance ?	07
	La défaillance	08
	Synthèse des types de maintenance	08
	Maintenance corrective	09
	Maintenance préventive	09
	Maintenance systématique	09
	Maintenance conditionnelle	10
	Exemples concrets de types de maintenance et fonctionnement	11

02	Choix du type de maintenance	13
	Critères de choix	14
	Intérêts de la maintenance conditionnelle	16

03	Essors de la maintenance conditionnelle	17
	Fonctionnement d'une solution de maintenance conditionnelle	18
	Acquisition et transmission de la donnée	20
	Stockage et analyse de la donnée	20
	Solutions logicielles	22

04	Exemples de cas d'usage et de paramètres couramment surveillés	24
	Vibrations	26
	Acoustique	26
	Rendement / Performances / Consommations	26
	Analyses Physico-chimiques	27
	Inspections visuelles et états de surface	27
	Autres cas d'usage	28

05	Comment concevoir une solution de maintenance conditionnelle ?	29
	Choix des équipements et défaillances à surveiller	30
	Méthodologie	30
	Choix des paramètres à surveiller	31
	Méthode de surveillance	34
	Seuils et comportement de l'alarme	36
	Prescrire ce qui doit être fait	44
	Conduire le changement	45
	Mise en exploitation des algorithmes prédictifs	46
	Conception des algorithmes prédictifs	46
	Mise en production des algorithmes prédictifs	48
	Maintenance des algorithmes prédictifs	49

06	Comment mener un projet de maintenance conditionnelle ?	51
	Équipe projet	52
	Structure et séquençement d'un projet	52
	Proof of Concept : POC	53
	Minimum Viable Product	53
	Industrialisation	53

07	Organisation	55
	Les différents rôles	56
	Faire ou faire faire	58

08	Perspectives	59
-----------	---------------------	----

Édito

GRTgaz assure une mission de service public visant à garantir la continuité d'acheminement du gaz naturel et des gaz renouvelables au sein des territoires français. Cette mission exige d'avoir un réseau de transport de gaz disponible 7j/7, 24h/24, tout assurant un très haut niveau de sécurité et des coûts maîtrisés pour ses clients.

En bref, **une défaillance du réseau priverait les consommateurs finaux d'une énergie essentielle** pour leur vie quotidienne ou leur activité industrielle.

Pour répondre à ces enjeux d'excellence opérationnelle, GRTgaz déploie **une politique de gestion de ses actifs**, en s'appuyant notamment sur une maintenance préventive adaptée. Dans un souci d'optimisation (coûts/performances/sécurité), les stratégies de maintenance tendent à évoluer d'une maintenance programmée (i.e. effectuée conformément à un échéancier) vers une maintenance conditionnelle (i.e. reposant sur l'évaluation de conditions physiques, obtenues par inspection sur site ou par télé-surveillance).

Au cœur de cette évolution : la connectivité des équipements et de nouvelles capacités d'analyse de données. Le développement de ces services s'est accompagné de l'émergence de solutions de « maintenance prédictive ». Rapidement nous avons eu des promesses alléchantes, reprises par les médias, autour de la révolution numérique de l'industrie.

Conscients qu'il est important de suivre l'état de l'art tout en conservant notre pragmatisme industriel pour assurer un haut niveau de compétitivité, nous recherchons des éléments probants avant de nous engager.

Mais comment faire la part des choses entre : le discours marketing des fournisseurs, la communication de certains industriels sur leurs projets vitrines et les techniques d'analyse de données encore naissantes dans ce contexte à l'époque ?



C'est dans cet état d'esprit que nous avons initié nos réflexions. Après avoir interviewé, testé, déployé, abandonné parfois, nous nous sommes forgés une expérience et des convictions. En partageant avec nos pairs industriels, nous nous sommes rendus compte que nos visions étaient souvent très proches et aussi éloignées du discours marketing simpliste que nous entendons encore aujourd'hui.

C'est pourquoi nous avons produit ce libre blanc. Vous constaterez que le défi du déploiement de ces solutions est tout autant technique qu'humain, car il nécessite de **changer les pratiques de tous les acteurs, depuis les techniciens de terrain jusqu'aux experts métier.**

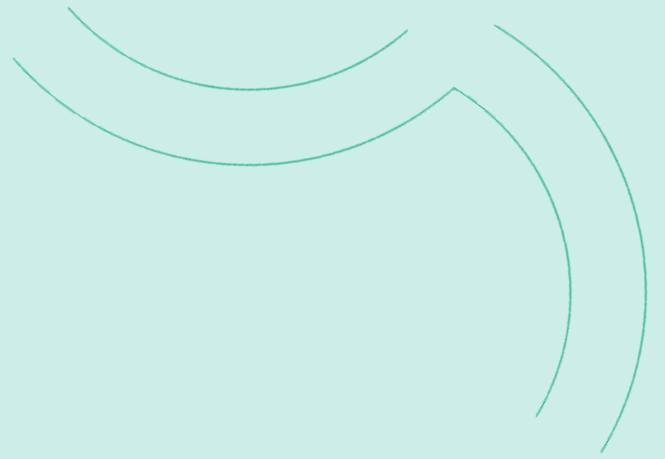
Enfin, à mon sens, bien que la maintenance prédictive puisse apporter beaucoup de valeur, elle ne remplacera pas partout les autres types de maintenance (périodique, curative). Cela dépendra de la criticité des équipements, des coûts et délais d'interventions, des mesures disponibles, de l'organisation de l'entreprise... Pourtant il est toujours possible d'optimiser la maintenance en prenant en compte plus de paramètres associés à une défaillance : enjeux en cas de panne, délais d'approvisionnement des pièces, maintenance opportuniste si agent à proximité, compétences des agents disponibles... et pour sûr les solutions numériques seront encore la clé pour réussir cette (r)évolution.

Bonne lecture,

François Libeyre,

Chargé de programme SI, Direction des Systèmes d'Information, GRTgaz

01.



Quels sont les différents types de maintenance ?



01 La défaillance

La maintenance est associée à la notion de défaillance. La **norme NF EN 13306** (2018) la définit comme une altération ou cessation d'un bien à accomplir sa fonction requise.

Après une défaillance, le bien est en panne, totale (cessation) ou partielle (altération de la fonction). Une défaillance est donc un événement, à distinguer d'une panne, qui est un état.

02 Synthèse des types de maintenance

Maintenance prédictive, maintenance augmentée, maintenance intelligente, maintenance 4.0... de nombreuses terminologies montrent l'usage croissant des technologies du numérique dans l'activité de la maintenance.

La norme NF EN 13306 (2018) spécifie les termes généraux et leurs définitions.

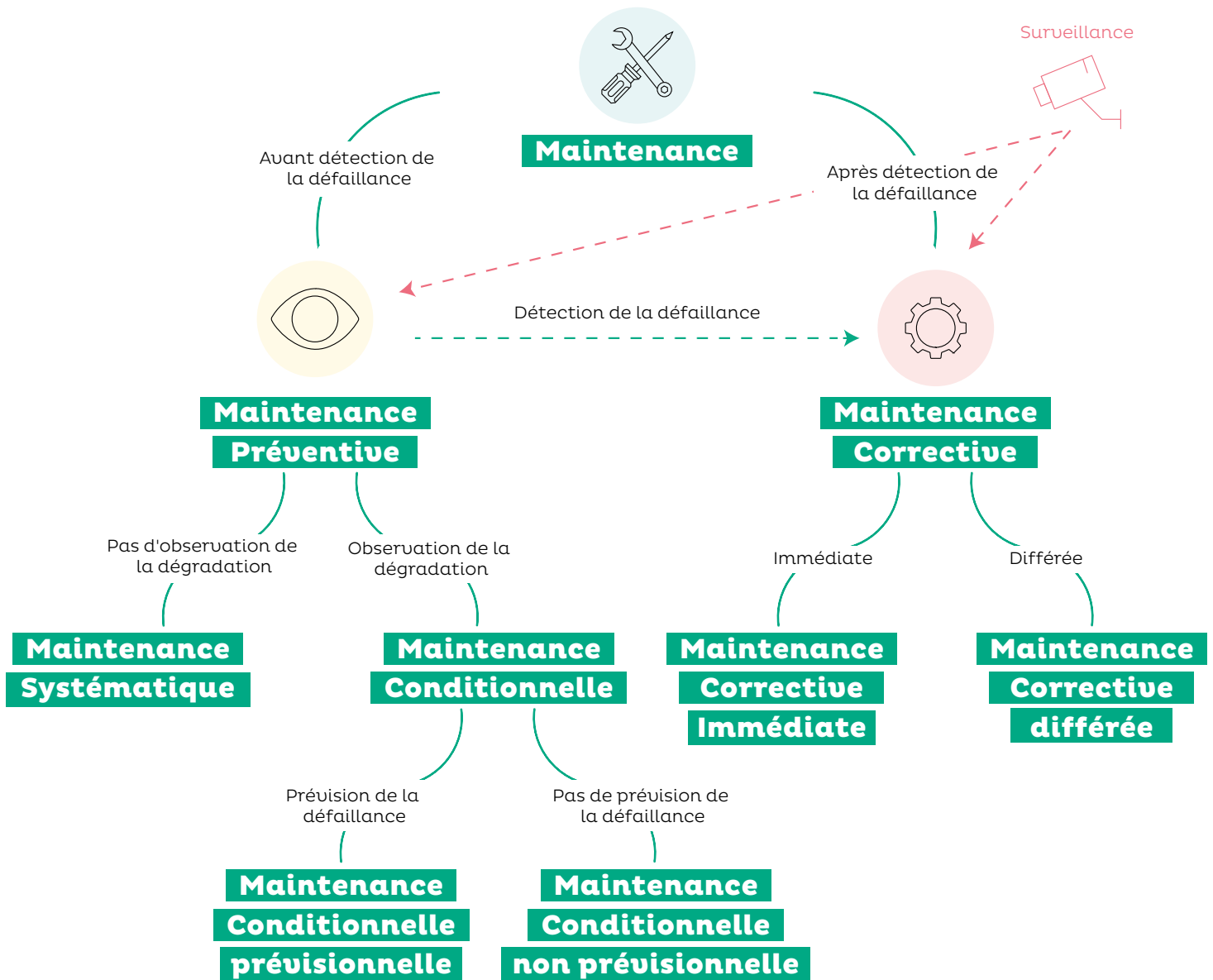


Figure 1 : Types de maintenance adapté de la norme NF EN 13306 (2018).

03 Maintenance corrective

La maintenance corrective, appelée parfois curative (terme non normalisé) est **effectuée après la détection d'une défaillance** et destinée à rétablir un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise.

On distingue deux sous types de maintenance corrective :

La maintenance corrective immédiate :

Une maintenance corrective immédiate n'est pas toujours «urgente», c'est plus une question de disponibilité des moyens de réparation.

La maintenance corrective différée :

Maintenance corrective qui n'est pas exécutée immédiatement après la détection d'une panne, mais est retardée en accord avec des règles de maintenance donnée. À noter que dans ce cas précis, on programme la maintenance après la défaillance.

Chaque action de maintenance corrective se déroule en quatre étapes :

1. Localisation
2. Diagnostic*
3. Correction de la panne
4. Essais : de fonctionnement de l'équipement après correction

**Exemple : Lors d'une action de fermeture d'une vanne, le capteur de fin de course constate la non-fermeture ou la fermeture partiel de la vanne et remonte ces compléments d'informations sur la défaillance.*

04 Maintenance préventive

La maintenance préventive est effectuée avant la détection d'une défaillance d'un bien, soit à des intervalles prédéterminés, soit selon des critères prescrits (critères définis à la suite de l'analyse de l'évolution surveillée de paramètres significatifs). Elle est destinée selon les cas à réduire la probabilité de défaillance ou la

dégradation du fonctionnement du bien, voire à détecter d'éventuelles défaillances.

Pour aller plus loin, la maintenance préventive se divise en deux types de maintenance : la maintenance systématique et la maintenance conditionnelle.

1. Maintenance systématique

La maintenance systématique est une maintenance préventive effectuée à intervalles de temps préétablis ou selon un nombre défini d'unités d'usage (*Nombre d'heures de fonctionnement, nombre de cycles, nombre d'unités produites, distance parcourue, etc.*), mais sans contrôle préalable de l'état du bien.

Il est nécessaire de connaître les modes de défaillance du matériel et l'occurrence de ses défaillances, afin de pouvoir élaborer le programme de maintenance systématique, c'est-à-dire définir les critères d'intervention (intervalles de temps ou le nombre d'unités d'usage) par équipement.

Différentes méthodes sont fréquemment utilisées pour élaborer un programme de maintenance, comme **L'AMDEC** (*Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et Criticité*) ; les arbres de défaillance, ou **L'OMF** (*Optimisation de la Maintenance par la Fiabilité*).

2. Maintenance conditionnelle

La maintenance conditionnelle est une maintenance préventive subordonnée à un type d'événement prédéterminé (auto-diagnostic, information d'un capteur, mesure d'une usure), ou à l'analyse de l'évolution surveillée de paramètres significatifs de la dégradation et de la baisse de performance d'un bien.

Ce type de maintenance nécessite un système de surveillance (continue ou partielle) qui peut être assuré par :

- L'observation réalisée par l'opérateur
- Des essais
- L'inspection
- Des capteurs remontant les valeurs de paramètres significatifs

a. Maintenance conditionnelle non prévisionnelle

Ce type de maintenance se distingue par son activité de mesure, d'analyse et de surveillance des données.

Elle exploite les informations collectées et estimées du **système**

(Modes de défaillance, données télé-relevée,...)

ou de son **environnement**

(Conditions météo : température, pluie /

Qualité fluide : gaz / huile de lubrification...),

pour adapter la stratégie de maintenance.

Une intervention n'est effectuée que lorsqu'un certain nombre de conditions sont remplies. Il s'agit de conditions précurseurs de la panne, ou qui augmentent sa probabilité d'occurrence. La réalisation de ces conditions est déterminée par le franchissement de seuils prédéfinis par les paramètres surveillés.

b. Maintenance conditionnelle prévisionnelle

La maintenance prévisionnelle est une maintenance préventive conditionnelle effectuée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien.

Plus précisément, elle se base sur **l'anticipation du franchissement de seuils prédéfinis par le(s) paramètre(s) surveillés**. La modélisation de l'évolution de ce(s) paramètre(s) peut permettre d'évaluer le temps restant avant la panne, c'est-à-dire le temps restant avant le franchissement de ces seuils, également appelé RUL (Remaining Useful Life) en anglais. Cette prévision va permettre aux équipes de maintenance d'intervenir efficacement avant la défaillance et de façon programmée.

La mise en œuvre d'une solution de maintenance prévisionnelle est complexe. En effet, elle nécessite de disposer d'un grand nombre de données (données de fonctionnement et de défaillance

Maintenance conditionnelle prévisionnelle, la suite

de l'équipement), et/ou d'une modélisation physique fiable des modes de défaillances de l'équipement.

Par conséquent, les cas d'usage de la maintenance prévisionnelle sont peu courants. On notera toutefois que ce type de maintenance est particulièrement adapté à des phénomènes progressifs, avec une cinétique lente, et prédictibles (Exemple: l'usure d'une plaquette de freins ; phénomène d'encrassement, ...).

Le terme « Maintenance Prédictive » n'est pas reconnu par les normes.

Il s'agit d'une traduction littérale du terme anglais « **Predictive Maintenance** », qui désigne la « Maintenance Prévisionnelle » en langue française.

Ce terme est néanmoins utilisé en langue française pour désigner les activités de Maintenance Conditionnelle, qu'elle soit prévisionnelle ou non, qui s'appuient sur des solutions innovantes de remontée et d'analyse des données (IoT, intelligence artificielle).

Par soucis de cohérence vis-à-vis de la **norme Européenne EN 13306**, dans la suite du document nous utiliserons le terme « **Maintenance Conditionnelle** », à la place de « Maintenance Prédictive ». Ce terme regroupe d'ailleurs plus largement la « Maintenance Conditionnelle Non Prévisionnelle », ainsi que la « Maintenance Conditionnelle Prévisionnelle ».

05 Exemples concrets de types de maintenance et fonctionnement

Prenons un exemple illustratif : **les plaquettes de frein d'une voiture.** Lorsque la pédale de frein est enfoncée, les plaquettes sont plaquées contre le disque de frein. L'énergie cinétique emmagasinée par la roue est alors

transformée en chaleur par les frottements entre les 2 corps. Comme illustré ci-dessous, ces frottements génèrent une usure des garnitures de frein, qui doivent être remplacées lorsque son épaisseur devient trop fine.

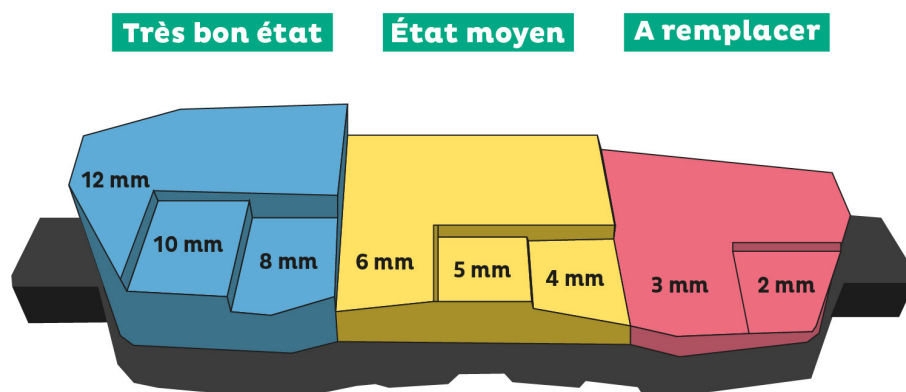


Illustration de l'usure des garnitures de freins automobile et des critères de remplacement

Voici un exemple des différents types de maintenance que l'on pourrait appliquer sur cet équipement :

- **Maintenance corrective** : on attend la perte de la fonction de freinage pour changer les plaquettes ;
- **Maintenance (préventive) systématique** : on décide de les changer tous les 25 000 Km, quel que soit l'état d'usure ;
- **Maintenance (préventive) conditionnelle non prévisionnelle** : on place un capteur de contrôle d'usure. Un système de surveillance avertira le conducteur (alerte / voyant lumineux) lorsque l'usure aura dépassé un seuil prédéterminé (fixé en mm), afin qu'il change les plaquettes avant de perdre la fonction de freinage ;
- **Maintenance (préventive) conditionnelle prévisionnelle** : on crée un modèle capable de déterminer l'évolution de l'usure des plaquettes en fonction du type de conduite du conducteur et de la fréquence d'usage de la voiture. Celui-ci préconisera une date de changement des plaquettes quelques semaines, ou moins, avant la prévision de la perte de la fonction de freinage.

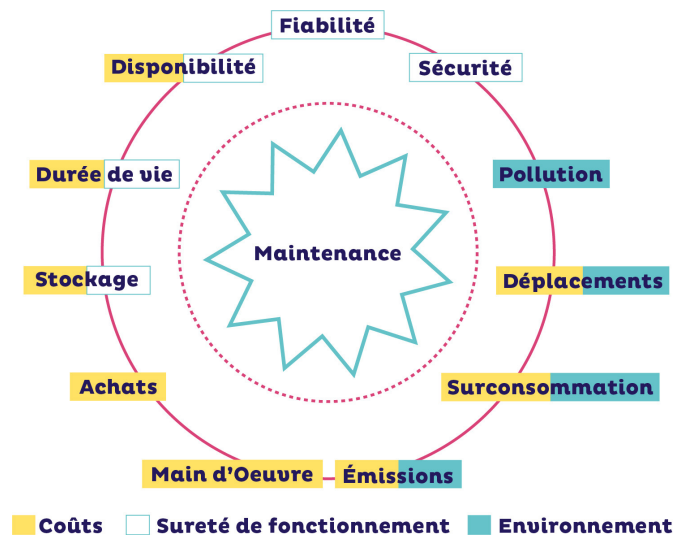
02.



Choix du type de maintenance



Il est important de noter que la maintenance n'a pas uniquement pour objectif d'améliorer la disponibilité des équipements. En effet, comme illustré ci-dessous, **la maintenance est au cœur d'enjeux parfois contradictoires** (Enjeux financiers, de sûreté de fonctionnement ou encore environnementaux). Elle est finalement un outil qui permettra d'atteindre le compromis souhaité entre ces enjeux, en fonction de la politique d'entreprise, à savoir ses priorités.



Enjeux autour de la maintenance

Par exemple :

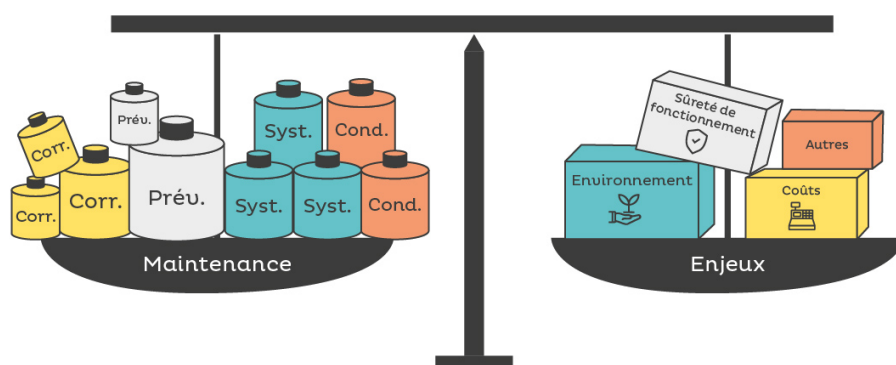
- **Dans l'aéronautique, les conséquences potentielles d'un accident étant particulièrement élevées, les exigences de fiabilité et de sécurité sont drastiques**, afin de rendre le risque d'accident extrêmement faible. Le critère de coûts est secondaire au regard de la fiabilité, qui doit être la plus élevée possible ;
- **Un constructeur automobile en B2C** (Business to Consumer), en revanche, **choisira un compromis plus orienté sur les coûts**, pour être attractif vis-à-vis de la concurrence, tout en garantissant un niveau de fiabilité acceptable mais en deçà des standards aéronautiques par exemple.

01 Critères de choix

Comme illustré ci-dessous, le choix du type de maintenance sera essentiel à l'atteinte du compromis désiré. Un industriel va souvent utiliser plusieurs types de maintenance pour un même

équipement. Il cherchera ainsi un optimum global entre la maintenance de l'ensemble de ses équipements et ses enjeux.

La maintenance comme outil pour atteindre le compromis recherché



Syst. Systématique
Corr. Corrective
Cond. Conditionnelle
Préu. Prévisionnelle

Le tableau qui suit présente les avantages et inconvénients des différents types de maintenance introduits pour aider au choix selon l'équipement considéré, l'organisation actuelle et ses capacités.

Type de maintenance	Avantages	Inconvénients	Cas d'application
Maintenance corrective	<ul style="list-style-type: none"> - Facile à mettre en œuvre - Fréquence d'intervention faible - Pas de coûts de développement 	<ul style="list-style-type: none"> - Indisponibilité non prévue et durée de vie des équipements non maîtrisée (défaillances non anticipées) - Besoin d'une forte réactivité des équipes - Coûts d'intervention aléatoires, parfois élevés (déplacements d'urgence) 	<p>Équipements :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Non critiques - Faciles à réparer - Pièces de rechange disponibles
Maintenance systématique	<ul style="list-style-type: none"> - Facile à mettre en œuvre - Indisponibilité prévue et durée de vie des équipements maîtrisée - Prix d'achat négociés grâce aux volumes - Planification des interventions anticipée et facilitée 	<ul style="list-style-type: none"> - Volumes d'achat importants - Fréquence d'intervention parfois élevée - Consommation de pièces et consommables importante 	<p>Équipements :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Soumis à une réglementation - Soumis à une dégradation « classique » - Soumis à des défaillances non détectées en ligne - Critiques* ou coûteux à réparer
Maintenance conditionnelle	<ul style="list-style-type: none"> - Défaillances anticipées - Nombre d'interventions optimisé - Disponibilité et durée de vie des équipements optimisée - Consommation de pièces et consommables optimale 	<p>En fonction du nombre de paramètres pris en compte et de l'incertitude des mesures :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Nécessite souvent des matériels additionnels et/ou un système de gestion de données spécifique - Développements potentiellement coûteux et complexes - Risques de ne pas détecter certaines défaillances à temps - Difficultés à maintenir les solutions - Risques d'alarmes intempestives 	<p>Équipements :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Coûteux* ou coûteux à réparer - Avec dégradations progressives et prédictibles

Avantages et inconvénients des différents types de maintenance

Il est possible de combiner différents types de maintenance. Par exemple les constructeurs automobiles et garages utilisent :

- **La maintenance corrective (réparations) depuis toujours ;**
- **La maintenance préventive systématique** (révision, contrôles techniques) depuis des décennies pour renforcer la disponibilité, la sécurité, ainsi que limiter les impacts environnementaux (contrôle des émissions des motorisations thermiques) ;
- Dernièrement, ceux-ci développent également des **solutions de maintenance conditionnelle** pour augmenter la disponibilité des véhicules et le contentement des usagers. Ces derniers sont avertis par l'IHM (voyant ou message) lorsque les prémices d'une défaillance sont identifiées.

*Équipements dont la défaillance (ou certaines défaillances) doit être évitée (perte de fonctions essentielles, risque de sécurité, difficultés à réparer, dégradation de l'image de la société, ...)

02 Intérêts de la maintenance conditionnelle

La maintenance conditionnelle va permettre à un industriel de mieux gérer son parc d'équipement. Les principaux types de gains possibles sont les suivants :

- **Augmentation de la disponibilité** (diminution de la probabilité de défaillances en service et des temps d'arrêt en cas de révision ou de panne), qui permet éventuellement de réduire des **CAPEX** de redondance
- **Augmentation de la durée de vie des équipements**
- **Meilleure anticipation des interventions de maintenance**
- **Diminution des surconsommations et émissions** (énergie, lubrifiant, pièces détachées, etc.)
- **Diminution des coûts de maintenance** (pièces de rechange, consommables & lubrifiants, stockage, déplacements optimisés et anticipés, main d'œuvre, coûts d'indisponibilité, pénalités financières en cas d'interruption de service, ...)
- **Meilleure connaissance du comportement des équipements utile au développement de l'expertise métier**, et facilitation du diagnostic avec l'analyse des données (Root Cause Analysis)

Certaines entreprises soumises à la concurrence choisissent également de développer ce type de maintenance pour se démarquer.

C'est notamment le cas de prestataires de maintenance et de fournisseurs d'équipements qui l'utilisent comme levier pour décrocher des contrats et augmenter leur chiffre d'affaires.

Plusieurs études menées en 2017 par [PwC](#), ainsi que [Deloitte](#), ont cherché à

quantifier certains de ces gains pour les industriels. Une autre étude de [McKinsey](#) (2015), affichent des gains bien plus importants, qui semblent toutefois moins réalistes, tout particulièrement pour un industriel comme GRTgaz.

Le Tableau ci-dessous synthétise les gains moyens affichés par ces études de la maintenance conditionnelle (couplée avec des solutions IoT) pour l'industrie.

Type Maintenance	Auteur	Types de gains			
		Coûts de maintenance	Disponibilité équipement	Durée de vie	Indisponibilité
Prévisionnelle	Deloitte	- 5 à -10 %	+10 à +20 %	-	-
	PwC	- 12 %	+ 9 %	+ 20 %	-
Conditionnelle et Prévisionnelle	McKinsey	- 10 à -40 %	-	+3 à +5 %	- 50 %

03.



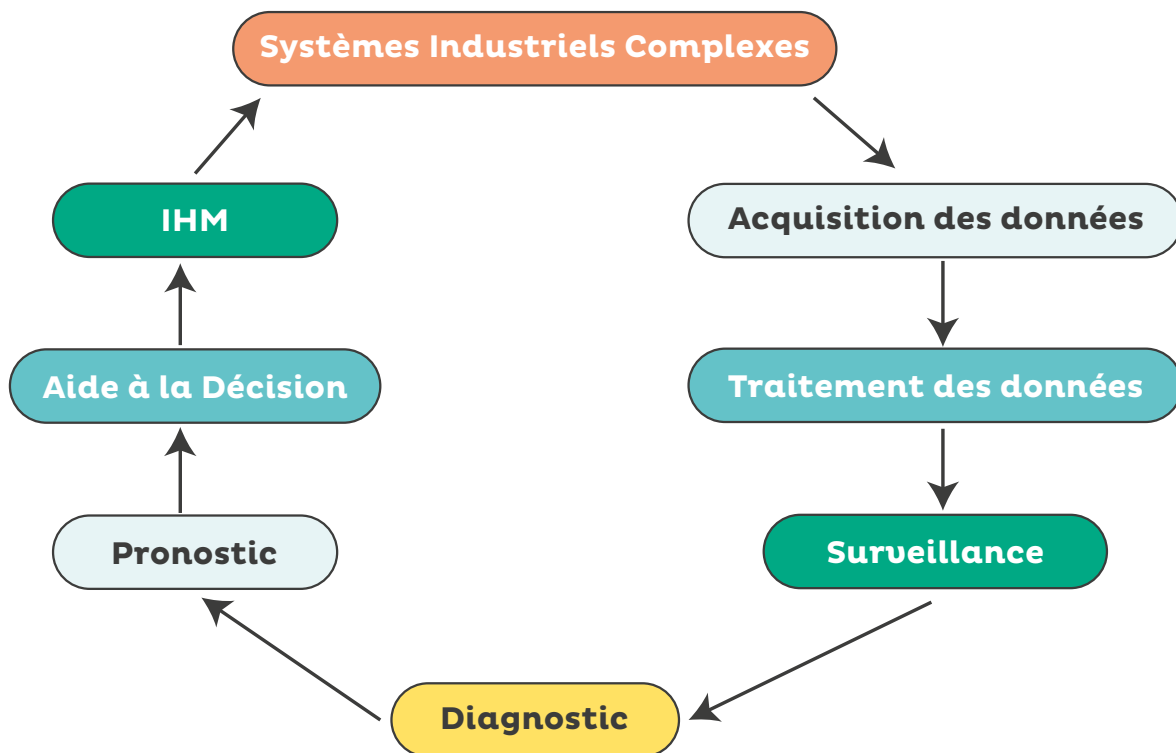
Essors de la maintenance conditionnelle



Le développement de la maintenance conditionnelle s'est appuyé sur l'essor de nouvelles technologies (IoT, solutions de stockage et d'analyse de la donnée en masse), ainsi que de solutions logicielles.

01 Fonctionnement d'une solution de maintenance conditionnelle

Une solution de maintenance conditionnelle suit les étapes suivantes (voir le schéma ci-dessous) :



OSA/CBM (Open System Architecture for Condition Based Maintenance) :
Architecture type d'un système informatique de maintenance conditionnelle

1.

Acquisition des données :
des données numériques issues de capteurs, ou saisies manuellement par un opérateur de maintenance (type d'intervention, cause, date, durée, etc.) sont transmises

2.

Traitement des données :
les données sont traitées afin de les rendre exploitable et d'en extraire des informations pertinentes pour détecter la présence d'une anomalie, ou encore l'état d'une dégradation. À terme, ces données permettront de représenter l'évolution de l'état du système surveillé au cours du temps

3.

Surveillance :
Le module de surveillance (ou détection) compare les données disponibles avec certaines valeurs attendues ou définies (seuils). Il doit être capable de générer des alertes en fonction de seuils préalablement fixés par les métiers et ainsi déceler rapidement une déviation par rapport à la normalité

4.

Diagnostic :

sur la base de la panne détectée, il identifie les causes probables de défaillance par un processus d'identification et d'isolation. Ce module de diagnostic requiert une connaissance fine des composants du système

5.

Pronostic :

ce module s'appuie sur les données issues des modules précédents afin de prédire l'état futur du système ou du composant surveillé et de donner une estimation de la durée de vie restante avant défaillance (également appelé RUL : Remaining Useful Life)

6.

Aide à la décision :

grâce aux informations du diagnostic et du pronostic (panne, composant(s) probable(s) défaillant(s), RUL,...), l'outil émet des suggestions (type d'intervention, délai d'intervention, ...) afin de faciliter la prise de décision, ainsi que l'organisation et la planification des actions de maintenance

7.

IHM :

Une Interface Homme Machine permet à l'utilisateur final de visualiser une synthèse des informations des autres modules, de planifier ou même lancer certaines actions de maintenance.



02 Acquisition et transmission de la donnée

Le développement des systèmes de télécommunication a rendu possible le développement et l'exploitation de solutions de maintenance conditionnelle dans un cadre industriel.

L'exploitation des données des capteurs installés pour des besoins de pilotage et de sécurité des installations, dont les valeurs sont télétransmises, ont permis **l'émergence de nombreux projets de maintenance conditionnelle.**

Pour des sites distants non-connectés, ou bien lorsqu'il est nécessaire d'ajouter de nouveaux capteurs, les industriels ont recours à **l'Internet of Things (IoT)**, qui regroupe :

- **Des capteurs connectés** à coût réduit, avec une faible consommation énergétique et une meilleure fiabilité
- **Des protocoles réseau** (LoRa : voir Figure ci-dessus, SIGFOX, WIZE) qui permettent de connecter des capteurs au cloud et à d'autres objets, avec une meilleure couverture réseau que la GSM, 3G ou 4G

En s'adaptant aux contraintes des industriels, l'IoT a rendu possible le développement et l'exploitation de **solutions de maintenance conditionnelle.** Cependant, tous les cas d'usages ne peuvent pas être couverts par ces technologies. En effet, **la capacité de la batterie** intégrée aux capteurs et **la bande passante** du réseau **limitent le volume et la fréquence de données** qui peuvent être transmises. Il faut alors se tourner vers des solutions plus classiques (alimentation secteur, télétransmission internet radio 3G/4G/5G).

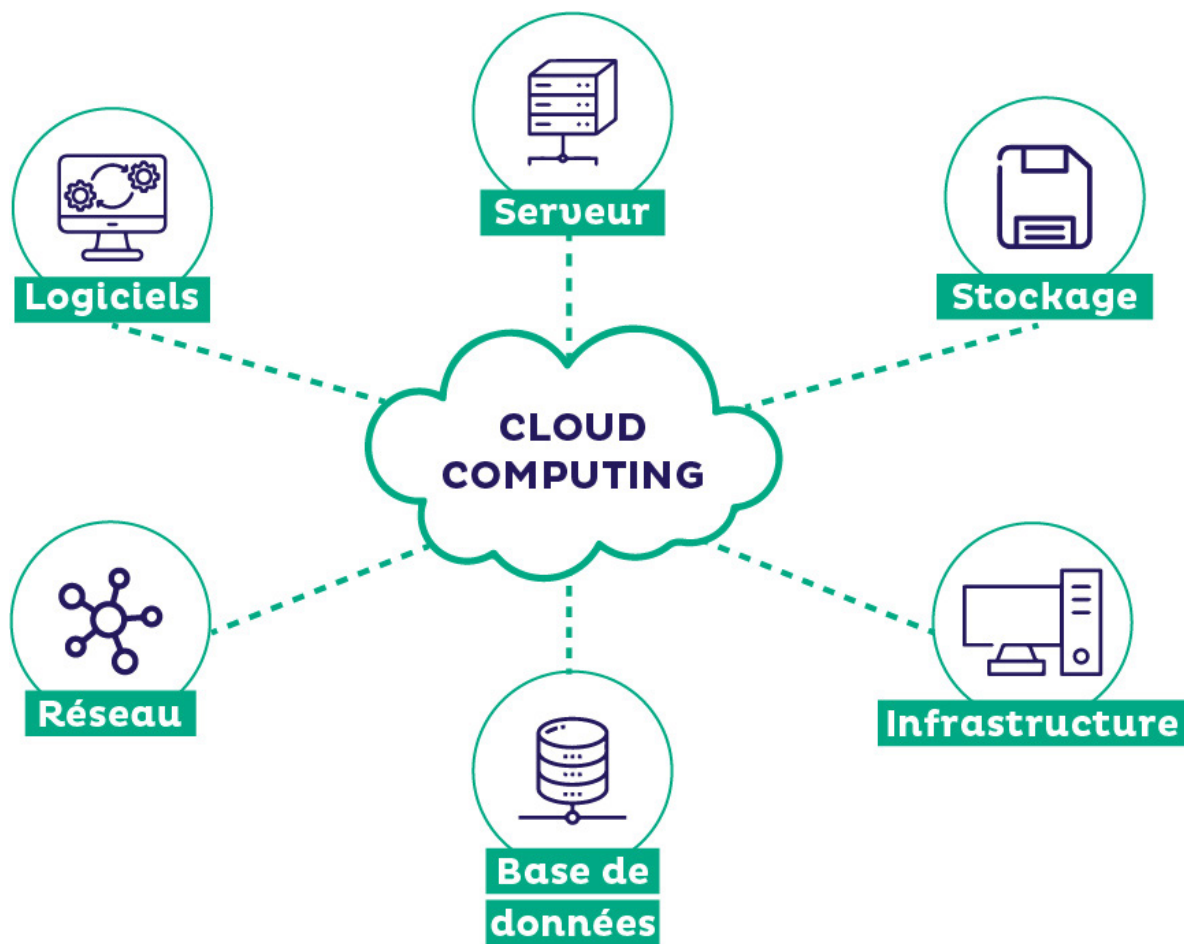


Antenne ATIM utilisant le protocole LoRa pour transmettre les données d'un poste Rebours

03 Stockage et analyse de la donnée

Les solutions de Cloud computing (**IaaS** : Infrastructure as a Service, **PaaS** : Platform as a Service et **SaaS** : Software as a Service) se sont développées ces dernières années avec la mise à disposition des puissances de calcul du cloud. Comme illustré ci-dessous, les entreprises et industries utilisent désormais largement ces solutions qui permettent de :

- Stocker des données en masse
- Croiser les données provenant de différentes sources (internes ou externes à l'entreprise)
- Rendre ces données disponibles à un grand nombre d'utilisateurs
- Augmenter la puissance de calcul



Cloud computing

L'intérêt de ces solutions de Cloud Computing pour la maintenance conditionnelle est évident. Cette architecture **facilite** aussi **le suivi d'un parc d'équipements** via des tableaux de bord et indicateurs clés.

Cependant, celui-ci ne s'arrête pas là. En effet, l'essor de l'IoT et des solutions de Cloud Computing a également favorisé **le développement d'algorithmes** élaborés de Machine Learning. Ces derniers sont notamment utilisés en maintenance conditionnelle, afin :

- **D'identifier les signatures des anomalies** dans les données et alerter l'utilisateur, voire déclencher des correctifs automatisés
- **De créer des modèles basés sur un historique de données** de fonctionnement, des caractéristiques des équipements, données du process et paramètres environnementaux (ex : météo) :
 - Modèle de comportement sain (ou anormal) de paramètres que l'on compare aux mesures terrain.
 - Modèle de classification de l'état de fonctionnement de la machine.
 - Modèle de prédiction de l'évolution d'une dégradation et d'estimation du temps restant avant la défaillance.

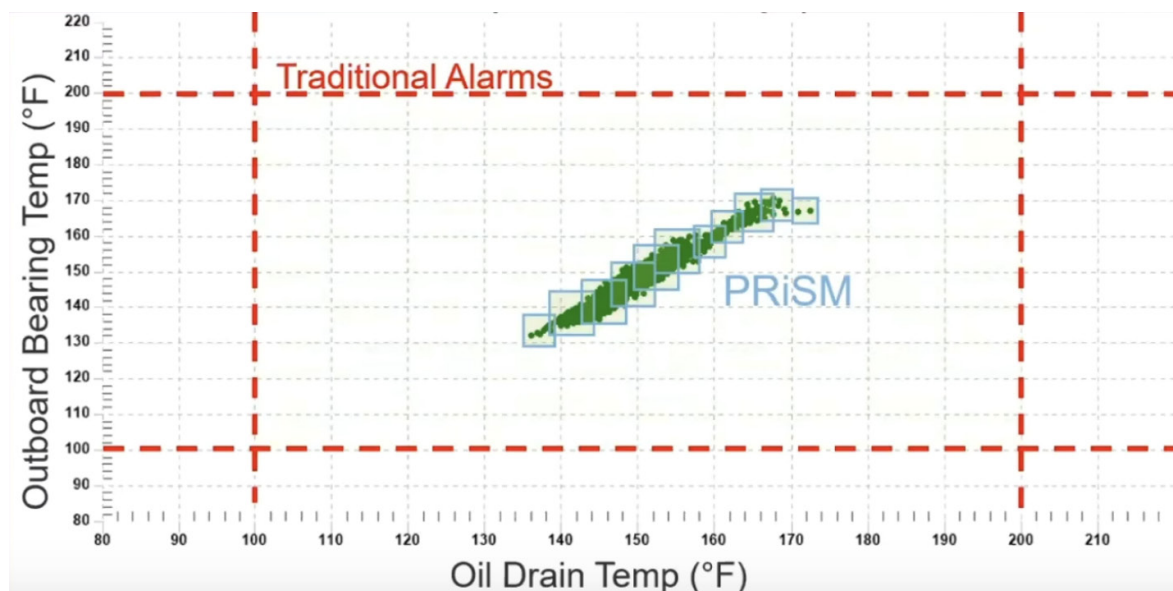
Au sein des systèmes de maintenance conditionnelle, ces modèles viennent compléter d'autres modèles physiques déjà existants.

04 Solutions logicielles

Pour finir, des **solutions logicielles “sur étagère”** ont été développées afin de favoriser la réussite des projets, mais aussi la mise en place et l'exploitation de solutions de maintenance conditionnelle. Parmi elles, on retrouve les logiciels **Smart Signal** de General Electric et **Prism** de AVEVA (ex Schneider Electric), largement déployés dans l'industrie de 2012 à 2015. La solution Smart Signal a été en test en 2016 chez GRTgaz au sein du département Maintenance Machines Tournantes de la Direction Technique.

Ces solutions visent à superviser des équipements critiques :

- Suivi de nombreux paramètres de fonctionnement avec seuils individuels paramétrables
- Apprentissage des modes de fonctionnements « normaux » basés sur l'historique de fonctionnement
- Détection de comportements anormaux et mise en évidence des paramètres entraînant l'écart (aide au diagnostic)
- Pré-diagnostic des défaillances basés sur des combinaisons prédéfinies d'alertes
- Prédiction de l'évolution (tendance) pour identifier le temps restant avant dégradation majeure



Visualisation des modes comportements « sains » appris par PRISM

Ils ont été déployés par de nombreux industriels, notamment de multinationales qui cherchaient une **solution clé en main**, déployable mondialement pour accompagner leur transformation (Air Liquide, TotalEnergie, Air France, EDF...).

Avantages

- Ergonomie : l'interface utilisateur est simple d'utilisation, un suivi des alertes est intégré dans l'outil et il est aisé de retrouver les graphiques des paramètres associés
- Adaptable à différents équipements
- Robuste car utilisé par de nombreux industriels, mise à jour assurée par l'éditeur
- Compatible avec un passage à l'échelle sur une flotte d'actifs
- Paramétrages possibles (alertes, seuils) pour adapter la solution à ses besoins

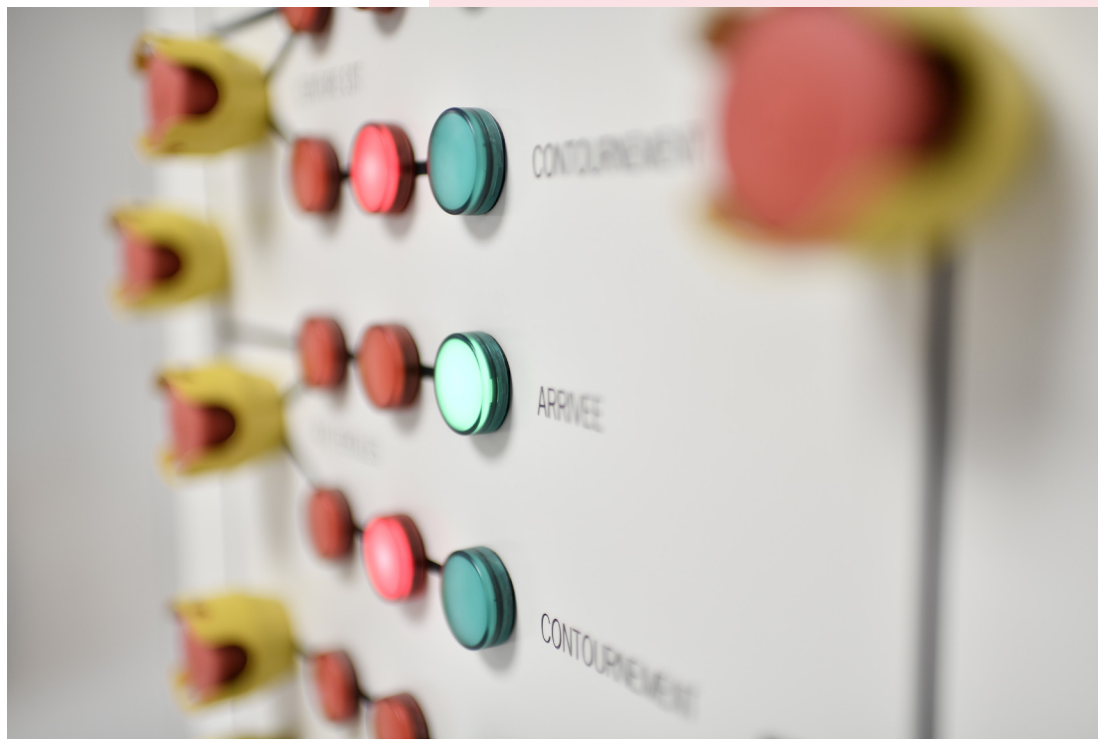
Inconvénients

- Coûts des licences élevés
- Fonctionnement en boîte noire : le fonctionnement du logiciel n'est pas transparent, bien qu'il soit largement paramétrable (ajout d'alarmes)
- Adaptés à certains actifs seulement (suivi temporel d'équipements avec nombreux paramètres corrélés)
- Besoin de formation important pour maîtriser et faire évoluer les paramétrages

Ces dernières années (2017-2022), les industriels ont tendance à développer leurs propres solutions logicielles pour répondre à des **besoins spécifiques, réduire les coûts**, ou mieux **maîtriser le fonctionnement des solutions de maintenance**. Mais ceux qui ont déployé ce type de solutions et construit une organisation autour continuent de les exploiter.

04.

Exemples de cas d'usage et de paramètres couramment surveillés



Plusieurs équipements sont particulièrement adaptés à la maintenance conditionnelle, car la **simple analyse** de certaines grandeurs physiques permet d'**établir un diagnostic**. Il

faut noter que ces diagnostics s'appuient sur des méthodes et expertises métier anciennes.

Les innovations concernent les solutions de remontée des données, de surveillance et d'analyse qui permettent de détecter la défaillance.

Les industriels ont équipés en priorité des **équipements critiques pré-équipés de capteurs**, en particulier les machines tournantes (compresseurs, pompes, turbines, moteurs...)

dans l'objectif d'**améliorer leurs disponibilités et d'éviter des pertes de production**. Il s'agit notamment d'identifier des vibrations anormales, signe de problèmes mécaniques à fort impact. Des solutions de maintenance conditionnelle ont aussi été déployées sur des process fluides et électriques pour identifier des fuites ou autres anomalies.

Équipements concernés par la maintenance prédictive

Une forte dominance des machines tournantes et actifs linéaires (transport de fluide / d'électricité)

- Tous les industriels* disposant de machines tournantes ont développé une solution sur ces actifs.
- Le suivi d'actifs linéaires (fuites process, T°/pression ou tension/intensité...) est le 2ème type d'actif le plus équipé.

• Machines tournantes	71%
• Actifs linéaires (fluide, élec.)	64%
• Qualité fluide (eau, gaz, huile...)	29%
• Structures / Ouvrages d'Art	29%
• Surveillance Végétation	21%
• Transformateurs électriques	21%
• Actionneurs	14%
• Régulateurs	14%

Pourcentage du panel d'entreprises ayant développé une solution de maintenance prédictive sur ces équipements.

*D'après un panel de 14 entreprises représentatives (Air France, EDF, RTE, Enedis, Engie, GRDF, GRTGaz, Air Liquide, Veolia, SNCF Voyageurs, SNCF Réseau, Eau de Paris, Socotec, Actemium)

Figure 9 Type d'équipement équipés de solutions de maintenance prédictive chez un panel d'industriels.

Dans la suite de cette partie, nous allons voir quelques exemples, non exhaustifs, de grandeurs physiques déjà largement utilisées en industrie pour la surveillance et la maintenance conditionnelle.

01 Vibrations

Tous les équipements comprenant des organes en mouvement produisent des vibrations lors de leur fonctionnement. **La dégradation d'un équipement va modifier son comportement vibratoire** (amplitude globale, spectre vibratoire, fréquence de résonance, ...).

Une **surveillance vibratoire** est particulièrement utile pour détecter des **défauts structurels ou mécaniques** sur des machines tournantes (compresseurs, pompes,

moteurs...).

Pour cela, on utilise généralement un **accéléromètre** (ou vélocimètre selon les plages de fréquences considérées, voir des proxymètres sur des paliers de machines importantes). De plus, il existe désormais des caméras hautes fréquence qui permettent de mesurer les vibrations d'une structure sans avoir à place de capteurs. Il existe des capteurs IOT pour mesurer le niveau global de vibration.

02 Acoustique

Le son émis par un équipement en fonctionnement peut-être également un bon indicateur de santé. En effet, la **surveillance d'une évolution des niveaux sonores et ultrasonore**, ou encore de l'**analyse spectrale** des sons émis par un équipement permet de détecter des fuites internes (eau, gaz naturel, air, ...), ainsi que des problèmes structurels ou mécaniques (fissure,

défaut d'assemblage, jeu mécanique, défaut de soudure...).

Les compresseurs, canalisations, joints, raccords, vannes, ou tout autre type d'équipements à travers lesquels transitent un fluide (liquide ou un gaz), sont de bons candidats pour ces types de surveillance.

03 Rendement / Performances / Consommations

Lors de leur fonctionnement, de nombreux équipements vont **consommer** (Exemple : moteur thermique ; appareils électriques ; ...), **produire** (Exemple : la surveillance du rendement d'un panneau solaire peut indiquer la présence de saletés sur les cellules photovoltaïques, empêchant le panneau de capter l'énergie solaire correctement) OU **transformer** (Exemple : Compresseur, transformateur) **de l'énergie**. Certains vont également consommer

un liquide lubrifiant, ou encore divers consommables (cartouches d'encre, ...).

Suivant le type de défaillance survenue, il arrive que la dégradation résultante de l'équipement soit accompagnée d'une **surconsommation** ou d'une **dégradation du rendement**.

Le suivi de ces paramètres est particulièrement utile pour identifier :

- Des fuites dans des circuits de lubrification, système de refroidissement ou des actionneurs hydrauliques / à air comprimé
- Un vieillissement de l'équipement
- Un encrassement
- Des défauts de paramétrages

04 Analyses physico-chimiques

Les analyses physico-chimiques d'un fluide (lubrifiant ; caloporteur ; gaz ; etc.) sont très utilisées en industrie.

La présence ou forte concentration de certains éléments, composés chimiques ou corps étrangers est l'indication d'une usure d'un équipement (*Exemple : la présence de particules métalliques dans une huile*), ou

encore un signe précurseur d'une panne.

De plus, la variation de certaines caractéristiques physiques du fluide, comme sa viscosité, vont aussi causer une usure rapide et prématurée des équipements, puisqu'il ne sera plus à même de remplir sa fonction de lubrification.

05 Inspections visuelles et états de surface

Les inspections sont des **méthodes de surveillance** très répandues qui englobent un nombre d'équipements et de cas d'usage très important. Parmi elles, on retrouve notamment les inspections visuelles effectuées à l'œil nu, les inspections intrusives

effectuées avec du matériel spécifique (endoscopie), ou encore les surveillances aériennes (images satellites, drones). Il est possible de coupler ce type d'inspection visuelle avec la **technologie LIDAR** (laser) pour obtenir des mesures de distance.

Elles permettent, entre autres :

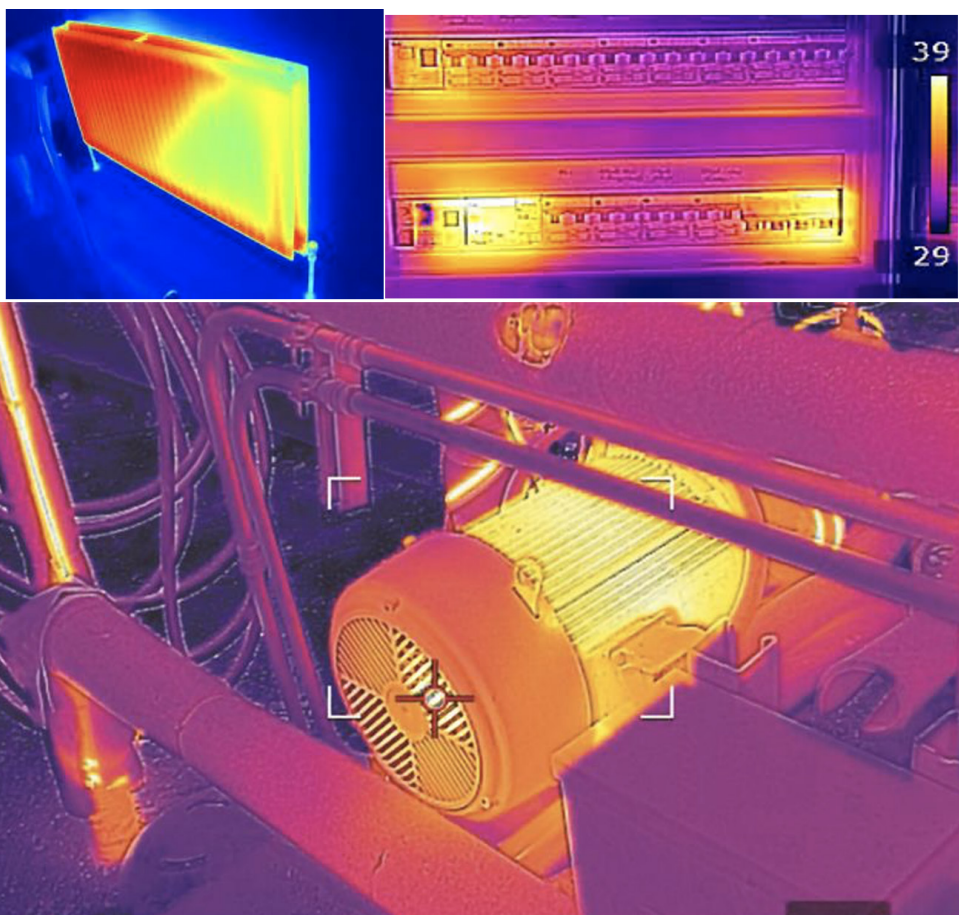
- De suivre l'état de la surface d'un équipement et de détecter :
 - Des problèmes structurels (fissure, défaut d'assemblage, jeu mécanique, défaut de soudure, ...)
 - Un changement de caractéristique de la surface (oxydation, corrosion, rugosité)
 - Une usure avancée d'une pièce (*Exemple : usure des garnitures de freins d'une voiture*)
 - La présence de certains composés chimiques ou encore un changement de propriété (viscosité, solubilité, ...) lorsqu'un fluide (huile, eau, ...) change de couleur
- De détecter la présence de corps étrangers
- D'identifier un changement d'environnement menaçant (*Exemple : développement de la végétation près du réseau de transport et de distribution d'électricité ou sur les rails*)

De plus, la mesure et l'analyse de courants électriques (courants de Foucault) à la surface d'un équipement sert également à déceler des défauts structurels ou encore des fuites dans des réseaux de transport de fluide (gaz, eau, ...).

06 Autres cas d'usage

Il existe de nombreux autres cas d'usage, que l'on ne pourra pas détailler de manière exhaustive. On peut néanmoins citer les 2 cas suivants :

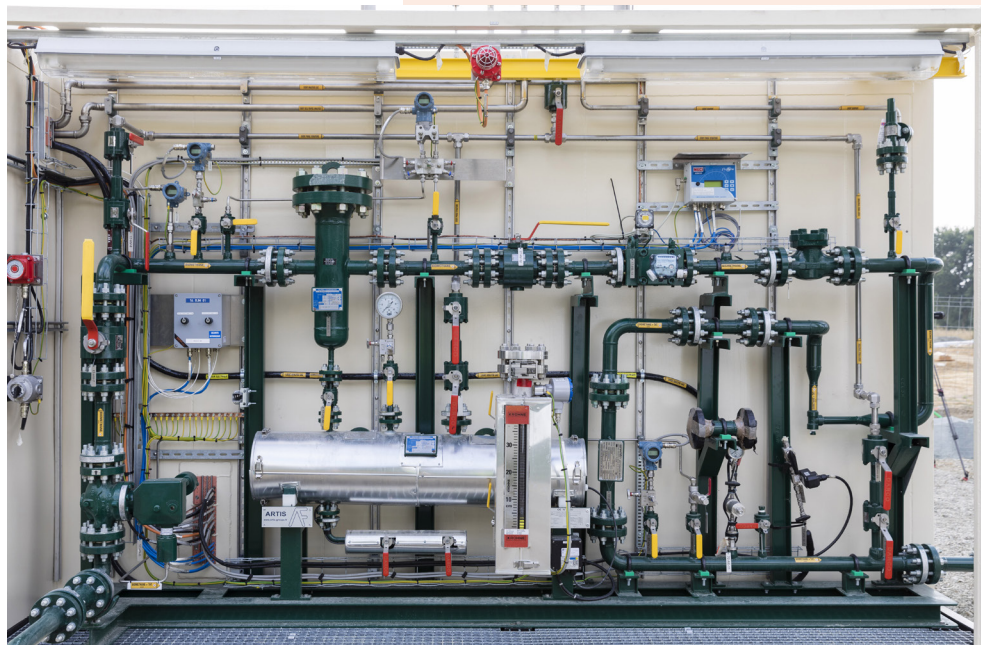
- L'analyse spectrale des signaux électrique d'alimentation pour détecter des défauts mécaniques sur des machines tournantes
- Tout type de contrôle non destructif (rayon X, ressuage, courants de Foucault...), notamment utilisés pour les contrôles de soudures
- **La thermographie :** utilisée par les industriels pour obtenir une image thermique d'une scène et détecter des fuites, des mauvais raccordements électriques, des sollicitations thermiques élevées, ou encore une mauvaise circulation d'un fluide (voir l'image ci-dessous).



Exemples d'images thermographiques

05.

Comment concevoir une solution de maintenance conditionnelle ?



01 Choix des équipements et défaillances à surveiller

La première étape de tout projet de maintenance conditionnelle, est de déterminer le périmètre de la solution, c'est-à-dire les équipements cibles.

Ces équipements sont choisis selon des critères économiques et de criticité :

- **Équipements critiques**

(Exemple : les chromatographes des sites d'injection biométhane sont des équipements critiques car leur défaillance entraîne une coupure de l'injection), dont toute défaillance (ou certaines défaillances) doit être évitée (perte de fonctions essentielles, risques de sécurité, difficultés à réparer, dégradation de l'image de la société, impact du client, ...)

- Équipements qui tombent fréquemment en panne et/ou dont les coûts de maintenance (corrective et systématique) sont élevés.

L'utilisation d'**AMDEC** (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et Criticité), d'arbres de défaillance et de données de retour d'expérience en exploitation et maintenance est très utile pour identifier ces équipements, ainsi que les défaillances à surveiller. Pour terminer le ciblage, on croise ces données avec celles des coûts de maintenance.

Une autre manière tout aussi efficace, consiste à aller **recupérer l'information auprès des exploitants et experts techniques lors d'ateliers.**

Exemple pour GRTgaz :

- Des opérateurs identifient des équipements à problème et font part de leurs intuitions quant à la possibilité d'anticiper leurs pannes
- L'expert précise les enjeux (criticité, coûts, ...) sur ces équipements et leurs pannes avec des analyses quantitatives. Il identifie les paramètres clés qui traduisent le comportement de l'équipement, de par sa connaissance technique enrichie des retours terrains.

02 Méthodologie

Une fois les équipements et les défaillances définis, la conception de la solution pourra débuter. Celle-ci sera séquencée en plusieurs étapes (voir le schéma ci-dessous), qui seront rejouées et affinées à chaque phase du projet ([Voir Structure et séquençage d'un projet, page 52](#)).

Ce processus doit s'appliquer à chaque type de défaillance. En effet les données et les méthodes d'analyse peuvent être radicalement différentes pour deux types de défaillance sur un même équipement. Il faut donc potentiellement **développer une solution de maintenance conditionnelle par mode de défaillance.**



Sélectionner les paramètres à surveiller

Définir la méthode de surveillance

Définir les seuils et le comportement de l'alarme

Prescrire ce qui doit être fait

Conduire le changement

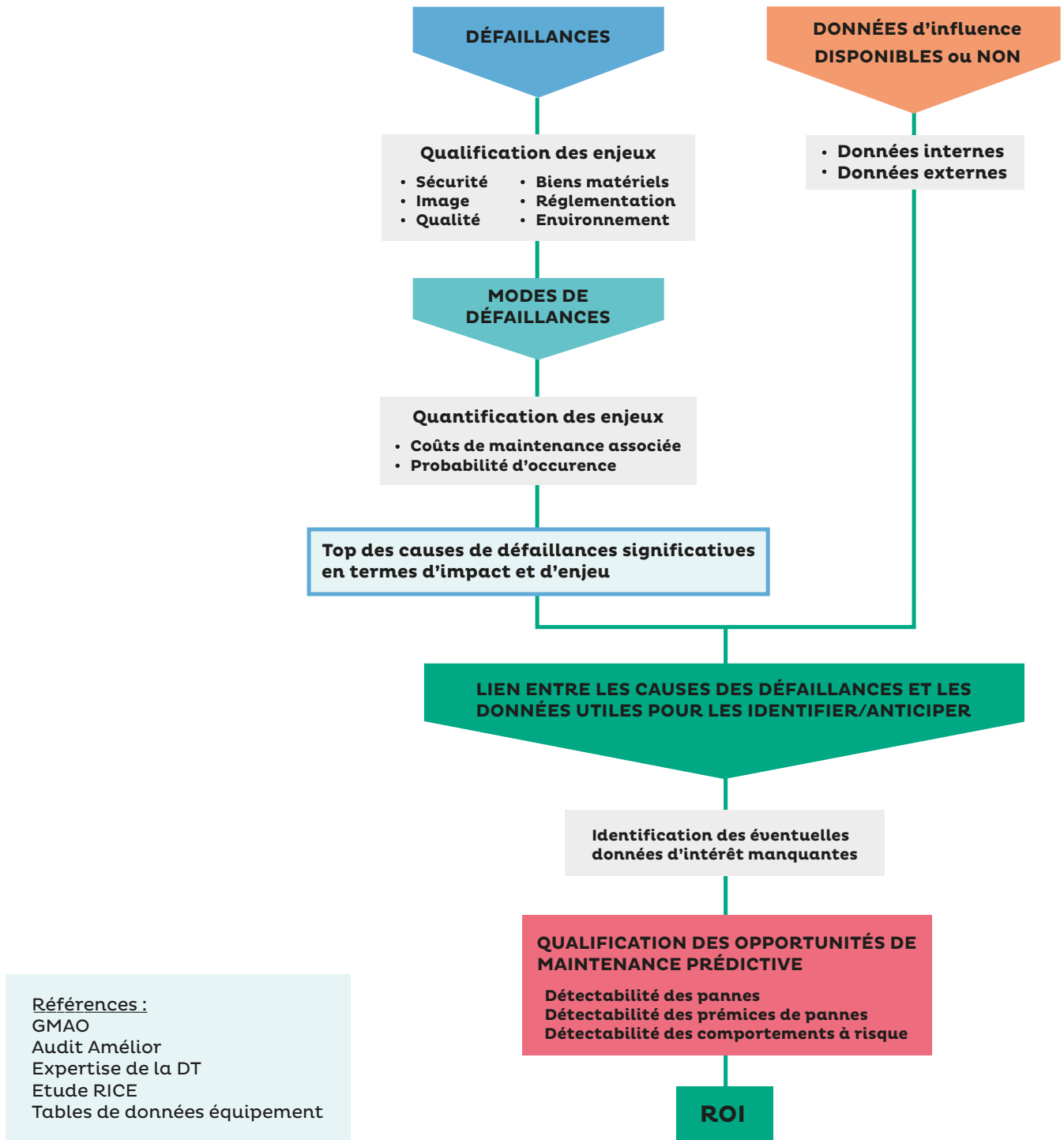
Etapes de conception d'une solution de maintenance conditionnelle

1. Choix des paramètres à surveiller

Lors du choix des paramètres à surveiller, il est préférable de s'orienter vers des **solutions sobres**, utilisant le moins de données possibles. En effet plus le nombre de paramètres suivis est important, plus les modèles sont complexes et plus la solution est dépendante d'un grand nombre de capteurs, ce qui augmente le risque de voir le système de surveillance dysfonctionner.

L'utilisation de données déjà existantes permettra également de limiter les coûts.

Cependant s'il y a des incertitudes sur les paramètres pertinents, il convient alors d'identifier tous ceux qui pourraient avoir une influence en s'appuyant sur l'expertise métier. Puis, dans le cadre de l'étude, il faudra identifier les plus pertinents vis-à-vis des défaillances à détecter et de se limiter à ces derniers pour la suite du projet. Voir la méthodologie dans le schéma ci-après.



Références :
 GMAO
 Audit Amélior
 Expertise de la DT
 Etude RICE
 Tables de données équipement

a. Données nécessaires et disponibles

La survenue d'une défaillance (ou ses prémices) peut se traduire par une **évolution anormale de certaines données caractéristiques**, on parle de signature. Les connaissances des experts et exploitants des équipements seront particulièrement utiles pour identifier ces données et les retraitements éventuels (min/max/

moyenne, écart types, décalages temporels, ou formules métiers plus complexes). Ces derniers seront également d'une grande aide pour déterminer, parmi les données nécessaires identifiées, celles qui sont déjà disponibles ou peuvent être reconstruites à partir de l'existant.

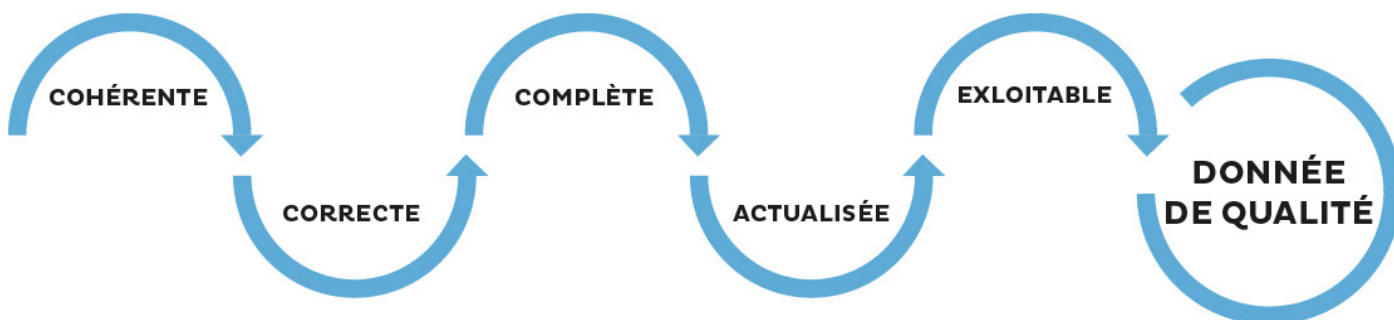
Lorsque les données nécessaires ne sont pas disponibles, plusieurs cas de figure se présentent :

- Les données peuvent être achetées ou acquises auprès de sociétés tierces (les données météorologiques)
- Les données peuvent être acquises en installant de nouveaux capteurs, tels que des capteurs IoT spécifiques
- Il est possible de faire modifier les équipements par le constructeur pour tenir compte du besoin en données
- Les données ne peuvent pas être acquises : l'acquisition de données peut s'avérer trop complexe, coûteuse ou impossible en l'état actuel des technologies de capteurs. Ceci est un cas de figure classique remettant en question un projet.

À noter : si aucun historique des données n'est disponible il faut alors attendre plusieurs mois, voire 1 an, pour avoir des données représentatives des différents modes de fonctionnement d'un équipement, ce qui a un impact fort sur le planning du projet.

b. Qualité des données

Dans le cas où les données sont présentes, il faut s'assurer de leur qualité, c'est-à-dire qu'elles répondent à plusieurs critères, comme illustré ci-dessous.



Critères de qualité d'une donnée

En effet, on rencontre de **nombreux problèmes de qualité** (Données manquantes ; données aberrantes ; incohérence entre les données issues de différents outils informatiques et/ou capteurs, etc), qui peuvent compromettre la faisabilité globale du projet, si les données sont inexploitables, ou bien conduire à des erreurs de diagnostic/fausses alarmes. **Ces problèmes peuvent être imputés à :**

- Des erreurs de conversion de données entre plateforme / outils
- La fiabilité des capteurs utilisés
- Un mauvais paramétrage des capteurs
- Une utilisation hors des plages de fonctionnement nominales

Tous ces cas de figure (absence et/ou mauvaise qualité des données) **doivent être identifiés en début de projet, lors du POC, et leur impact sur le développement de la solution évalué d'un point de vue coût et délai.** L'apprentissage d'algorithmes nécessitant généralement un historique important de données, le projet ne pourra démarrer que lorsque des données de qualité auront été collectées pendant une période suffisamment longue avec là encore un impact sur le planning du projet.

2. Méthode de surveillance

Une fois le(s) paramètre(s) à surveiller sélectionnés, il convient de définir quelle forme de surveillance mettre en place pour détecter la signature de la défaillance recherchée.

L'objectif de cette étape est de **définir la façon dont on va repérer la défaillance**

(ou les prémices de la défaillance) à travers les paramètres sélectionnés.

Plus précisément, on cherche à caractériser comment cela se traduit dans leur comportement et **quelles méthodes utiliser pour faciliter cette identification.**

a. Types de surveillance

De plus, il existe 2 types de surveillance notables, qui peuvent répondre à des besoins différents :

La surveillance continue

les données concernant l'état du matériel surveillé sont disponibles à tout moment (C'est le cas pour de nombreux postes techniques GRTgaz dont les informations de fonctionnement remontent dans le SCADA (ex : pression, débit, vibrations, ...)) ou à intervalle de temps réguliers et rapprochés

La surveillance discrète

l'information concernant l'état du matériel n'est disponible qu'à certains moments
(Il s'agit de matériels soumis à des campagnes d'inspection (exemple : canalisations, ou inspection des rails lors du passage du train équipé de capteurs), ou encore des tests. Certains capteurs IoT fonctionnent aussi par intermittence : ils envoient de l'information lors d'événements spécifiques, tels que les ouvertures ou fermetures de vannes / portes, les changements de positions, etc.).

Le choix du type de surveillance et de sa fréquence sera souvent contraint par :

- Les capacités et l'autonomie des capteurs
- Le type de défaillance
- Le mode de fonctionnement de l'équipement surveillé (continu ; temporaire ; ponctuel).

b. Méthode de détection du comportement anormal

Afin d'identifier des comportements anormaux et des défaillances, la méthode la plus répandue consiste à **se comparer à un état de référence et mesurer l'écart avec les mesures terrain.**

Dans les cas les plus simple on se contentera d'un simple seuil, mais généralement les valeurs paramètres fluctuent en fonction de modes de fonctionnement qu'il faut caractériser.

Le cas le plus simple est de **comparer directement les paramètres**

Une autre approche peut consister à **identifier les signatures caractéristiques des défaillances** évoquées précédemment. Les signatures / comportements anormaux les plus classiques que l'on peut observer en cas de défaillance sont les suivants :

- Atteinte de valeurs anormalement hautes / basses (Température ou niveau de vibration élevé, en dehors des plages de fonctionnement constructeur)
- Dérive des valeurs (Exemple : pour les chromatographes, on détecte l'encrassement via la dérive progressive des temps de rétention dans la colonne des constituants du gaz analysé)
- Atteinte de valeurs inattendues (jamais observées sur l'historique de donnée, stabilisation à une/des valeur(s) spécifiques de secours) (Exemple : la pression aval des postes de détente GRTgaz se stabilise à une valeur plus basse lorsque le circuit de secours prend le relais)
- Variations brusques
- Patterns caractéristiques : instabilité (dents de scie), excursions, autres.

c. Mode de surveillance

Une fois la signature de la défaillance caractérisée et la méthode de détection définie, il faut choisir un **mode de surveillance adéquate** :

- Analyse des données par un système de surveillance automatisé, formé et capable de détecter les défaillances, puis alertes
- Surveillance périodique des paramètres par un agent

Passée cette étape de définition de la méthode de surveillance, vient celle de la **définition des seuils et des critères de déclenchement de l'alarme.**

3. Seuils et comportement de l'alarme

La définition des seuils est une **étape critique** qui va définir la performance de la surveillance, avec un équilibre à trouver entre détection exhaustive des anomalies et nombre de fausses alarmes.

a. Performance d'un modèle

Les critères usuels pour l'évaluation de modèles s'appliquent aux solutions dédiées à la maintenance.

Rappel

Capacité à détecter les défaillances (ou leurs prémices) sur les plages de fonctionnement considérées, sans tenir compte des fausses alarmes

$$Rappel = \frac{\text{nb défaillances correctement détectées}}{\text{nb défaillances réelles}},$$

$$0 \leq Rappel \leq 1$$

Précision

Capacité d'une solution à fournir des détections pertinentes, c'est-à-dire éviter les fausses alarmes, sans tenir compte de la proportion de défaillances réelle qui ont pu être détectées

$$Precision = \frac{\text{nb défaillances correctement détectées}}{\text{nb défaillances détectées (vrai + faux positifs)'}}$$

$$0 \leq Précision \leq 1$$

F1score

Le F1 permet de concilier les critères rappel et précision : capacité à détecter et à discerner correctement des défaillances (ou leurs prémices) sur les plages de fonctionnement considérées

$$F1score = 2 \cdot \frac{\text{précision} \cdot \text{rappel}}{\text{précision} + \text{rappel}}$$

Selon l'enjeu de l'actif on pourra privilégier l'un ou l'autre de ces indicateurs, ce qu'il faudra clarifier

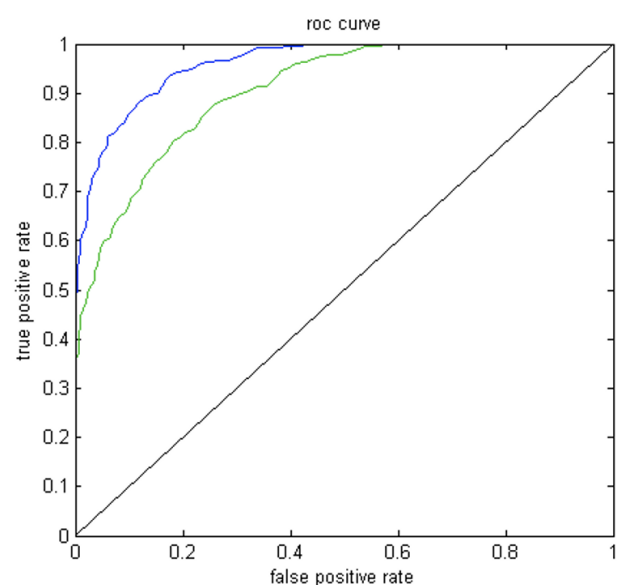
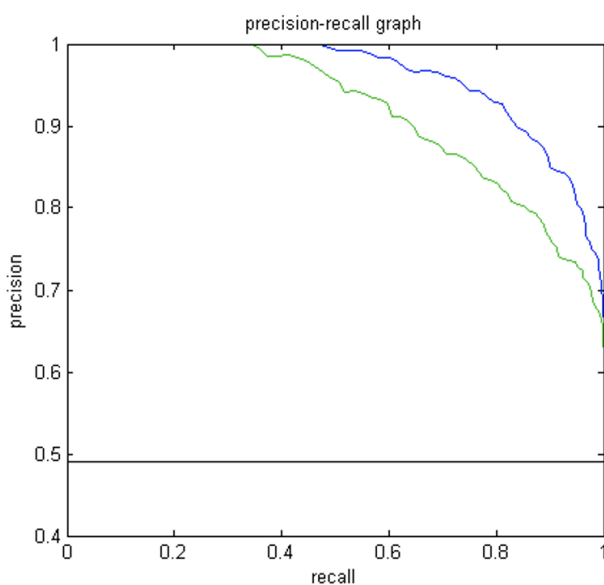
lors de l'étude du projet.

Par exemple il est possible de privilégier la solution avec le meilleur rappel, malgré une faible précision qui équivaut à des fausses alarmes, pour des actifs critiques sur lequel la moindre de défaillance (ou ses prémices) doit être à tout prix évitée. Dans le cas de seuil sur un écart au modèle, on choisira alors des seuils assez étroits. Inversement pour des actifs peu critiques sur lesquels l'objectif est d'éviter les fausses alarmes quitte à rater certaines prémices d'anomalies, on privilégiera un seuil large.



Afin de voir **l'impact du choix du seuil** sur les critères de performance, il est courant d'avoir recours à des courbes. La plus courante est **la courbe ROC** qui présente le compromis entre **taux de vrais positifs** (fraction des positifs qui sont effectivement détectés) et **taux de faux positifs** (fraction des négatifs qui sont incorrectement détectés). Chaque point de la courbe correspond à une valeur de seuil donnée, avec les valeurs de taux de faux positifs/faux négatifs associée. Cela permet de retrouver le seuil qui correspond le mieux aux attendus du modèle.

Cependant la courbe ROC présente des limites dans le **cas de « classes déséquilibrées »**, c'est-à-dire lorsque le **nombre de données associées aux défaillances est très faible par rapport à celles associées à un fonctionnement sain**. Ce cas se présente souvent dans le cadre des applications pour la maintenance. En effet il est possible d'avoir beaucoup plus de fausses alarmes que de vraies alarmes, mais - si le nombre de valeurs sans défaillance est très important dans les données, alors le taux de faux positifs restera très faible. Aussi on privilégiera **la courbe précision/rappel** pour les cas d'usage appliqués à la maintenance.



Courbes ROC et précision-rappel comparant 2 modèles (courbes bleu et verte)

b. Seuils pour le suivi des séries temporelles

Dans le cas classique où **la surveillance se base sur le suivi temporel de paramètres de fonctionnement**, il existe 2 types de seuils :

- **Le seuil fixe** : indépendant des conditions de fonctionnement et de tout autre paramètre
- **Le seuil dynamique** : évolutif suivant les conditions de fonctionnement

1

Seuil fixe

On peut utiliser un seuil fixe pour **délimiter des plages de fonctionnement que le paramètre surveillé ne doit jamais franchir**

(Exemple : en sortie du réseau de transport, post-détente, on fixe un seuil de pression averse maximum égale à la PMS : valeur de pression maximale acceptable par le réseau de distribution de gaz).

Ces seuils ont l'avantage d'être simples à mettre en place, à calibrer, à tester et à maintenir.

En revanche, si le paramètre est amené à varier lorsque les conditions de fonctionnement varient, sans que l'équipement soit défaillant, alors la surveillance associée sera peu performante ou même inadaptée.

Prenons l'exemple d'un filtre à cartouche du réseau de transport de gaz. La différence de pression à ses bornes (Delta P), dépend à la fois du débit de gaz qui le traverse, mais aussi de l'encrassement de la cartouche. Par conséquent, la mise en place d'un seuil fixe haut sur la Delta P d'un tel filtre aura une mauvaise performance, car elle ne permettra pas de distinguer si cette valeur élevée de Delta P est légitime en raison d'un fort débit, ou bien le témoin d'un encrassement important. L'utilisation d'**un seuil dynamique prenant en compte les valeurs instantanées de débit permet d'améliorer grandement la performance de la surveillance résultante.**

2

Seuil dynamique

Un seuil dynamique est plus complexe à mettre en place. Il nécessite une connaissance plus fine de l'équipement et du comportement du paramètre surveillé en cas de défaillance.

On utilise ce type de seuil pour plusieurs raisons, à savoir :

- Lorsque l'on souhaite améliorer la couverture, le discernement ou la performance d'une surveillance par rapport à un seuil fixe (voir l'exemple précédent)
- Lorsque les plages de valeurs acceptables pour le paramètre suivi changent suivant les conditions de fonctionnement.

Une technique répandue pour obtenir un seuil dynamique consiste à **ajouter un seuil fixe à un modèle de comportement du paramètre surveillé**. Ce modèle peut être :

- Une fonction mathématique dépendante d'un ou plusieurs paramètres d'influence (Exemple : un modèle physique de vibration basé sur la vitesse de rotation du compresseur)
- Une fonction non-continue dépendante de statuts variés (météorologiques (Exemple : la vitesse maximale autorisée sur autoroute en France est de 110 km/h en cas de pluie, 130 km/h dans les autres cas.), état d'ouverture / fermeture, ...)

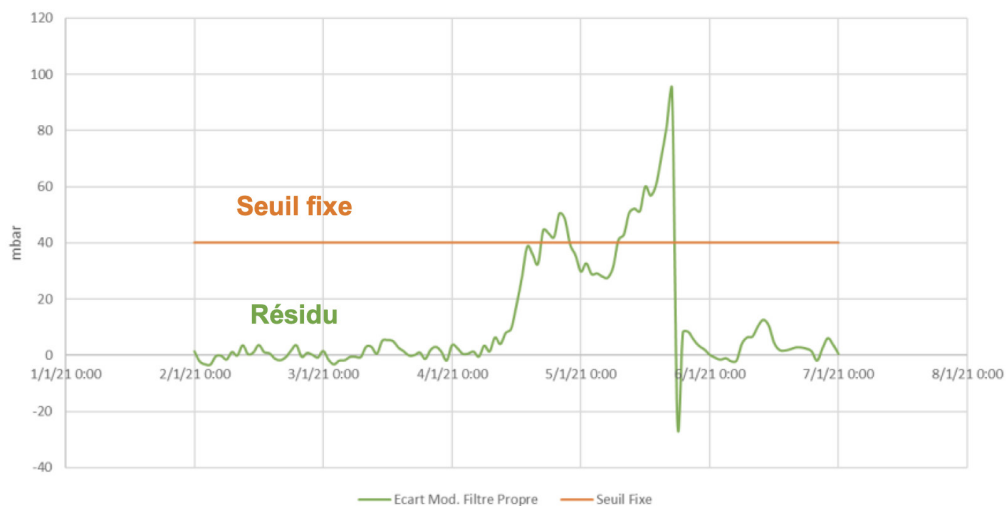
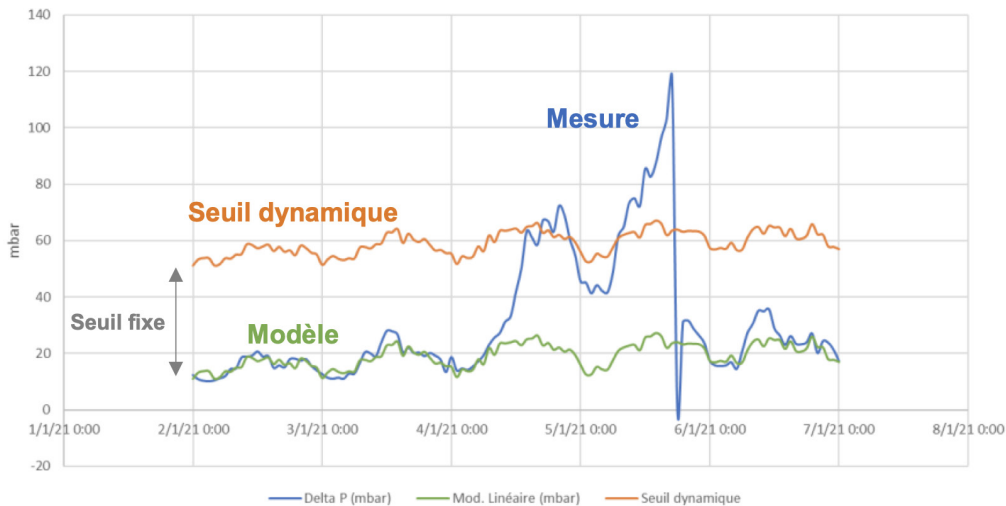
Seuil dynamique, la suite



Certains industriels utilisent également **la même variable d'un autre équipement fonctionnant en parallèle** (ou la variable mesurée lors de la dernière inspection (Exemple : SNCF Réseau cherche à superviser son réseau en comparant les mesures vibratoires enregistrées par le passage de deux trains successifs)) **comme seuil** (Exemple : Air France compare les variables des 2 moteurs pour s'assurer de leur bon fonctionnement). Ils vérifient que l'écart entre les deux variables ne dépasse pas un seuil fixe prédéterminé.

Pour superviser un paramètre via un seuil dynamique, **on peut vérifier soit que la mesure du paramètre ne dépasse pas le seuil dynamique, soit que le résidu** (écart entre le modèle et la mesure) **ne dépasse pas le seuil fixe**. Cette équivalence est illustrée ci-dessous pour la supervision de la différence de pression (Delta P) aux bornes d'un filtre à cartouche.

Comparaison du Delta P et des modèles

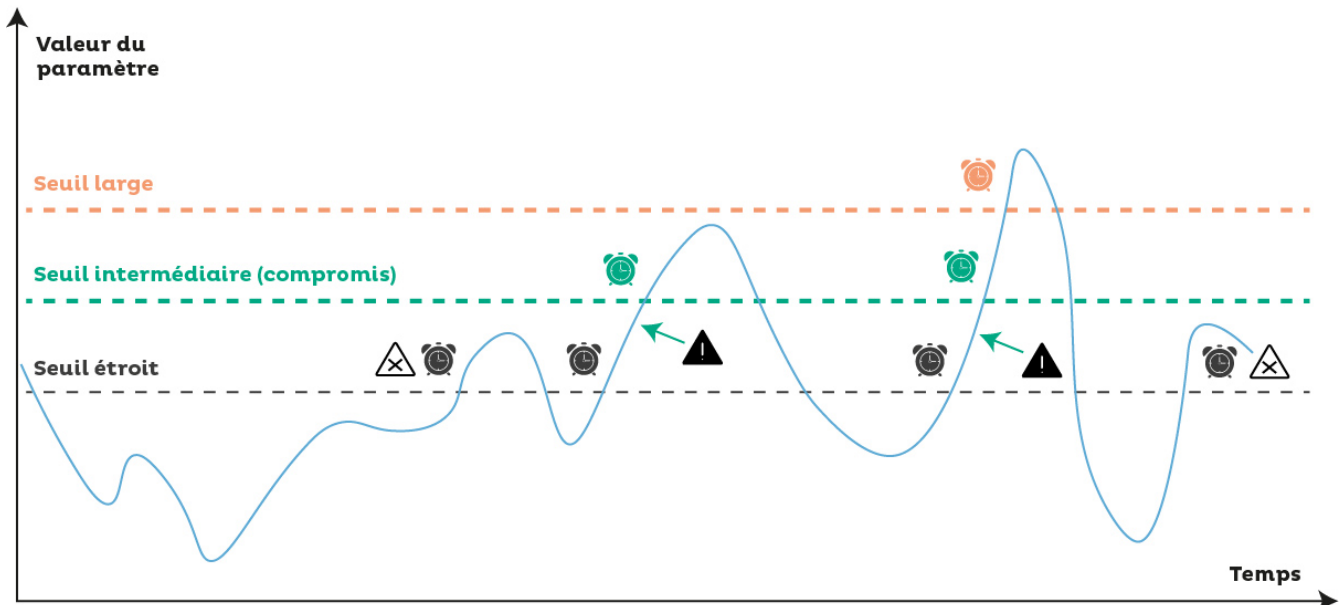


Exemple de construction d'un seuil dynamique à partir d'un modèle de Delta P pour les filtres

c. Calibration des seuils

Comme illustré ci-dessous, le choix de la valeur du seuil de surveillance doit être fait avec attention, car il impacte également la couverture, le discernement et la performance de la surveillance, mais aussi sa réactivité.

	Seuil étroit	Intermédiaire	Seuil large
Couverture	1	1	1/2
Discernement	0	1	1
Performance	0	1	0,5



Calibrer un seuil pour atteindre la meilleure performance

En effet, **un seuil trop étroit permettra d'avoir une très grande réactivité, ainsi qu'une excellente couverture.** Presque toutes les défaillances seront rapidement détectées, laissant plus de temps à l'exploitant pour s'organiser et intervenir. **Néanmoins, cela expose aussi l'utilisateur à de fausses alarmes** (manque de discernement de la surveillance). Celles-ci peuvent être réellement gênantes si elles sont trop nombreuses, car il sera alors **difficile de distinguer une fausse alarme d'une réelle défaillance**, ce qui risque de détourner l'utilisateur de la solution, qui deviendra alors inutile. De plus, ces fausses alarmes peuvent s'avérer coûteuses si l'exploitant se déplace pour constater l'absence de défaillance, ou va même jusqu'à effectuer une action de maintenance non nécessaire.

Inversement, un seuil trop large diminuera le rappel de la surveillance, c'est-à-dire que l'on risque de ne pas détecter certaines prémices de défaillances ou certaines pannes, mais augmentera sa précision. Dans ce cas de figure, la panne ne sera plus anticipée mais subie. L'exploitant devra alors se déplacer rapidement pour effectuer des actions de maintenance corrective.

Comme on vient de le voir, **calibrer un seuil revient à trouver un compromis entre le rappel de la surveillance et sa précision.** Il ne devra être ni trop étroit, ni trop large. C'est un choix délicat, souvent laissé aux exploitants et utilisateurs de la solution, qui n'ont pas toujours de méthodes ou d'outils à leur disposition pour orienter leur

choix, mais aussi vérifier son effet. Ils se fient donc logiquement à leur intuition, mais sans certitude d'obtenir un résultat satisfaisant.

Afin de valider un changement de seuil, ou d'en définir un lors de la création de la solution, **il faut idéalement pouvoir mesurer la performance de la solution configurée avec ce seuil**. Pour ce faire, il est conseillé de faire tourner la solution avec cette configuration sur un historique de données où l'on connaît parfaitement les défaillances et dates auxquelles elles ont eu lieu. Si les défaillances et dates de défaillances mises en avant par la solution avec ce nouveau seuil sont cohérentes avec ce qui était connu

et attendu, alors on peut considérer que la calibration du seuil est bonne. A l'inverse, s'il y a un écart significatif, il faut de nouveau paramétrer ce seuil jusqu'à obtenir un résultat satisfaisant.

Dans le cas où les plages de valeurs acceptables du paramètre suivi changent, comme cela est souvent le cas lors du vieillissement d'un équipement ou après une maintenance, alors il faudra **intégrer le retour d'expérience, ainsi que l'analyse des experts techniques et exploitants** afin de calibrer le nouveau seuil. On parle de réentraînement de l'algorithme de détection.

d. Définition du comportement de l'alarme

Activation de l'alarme

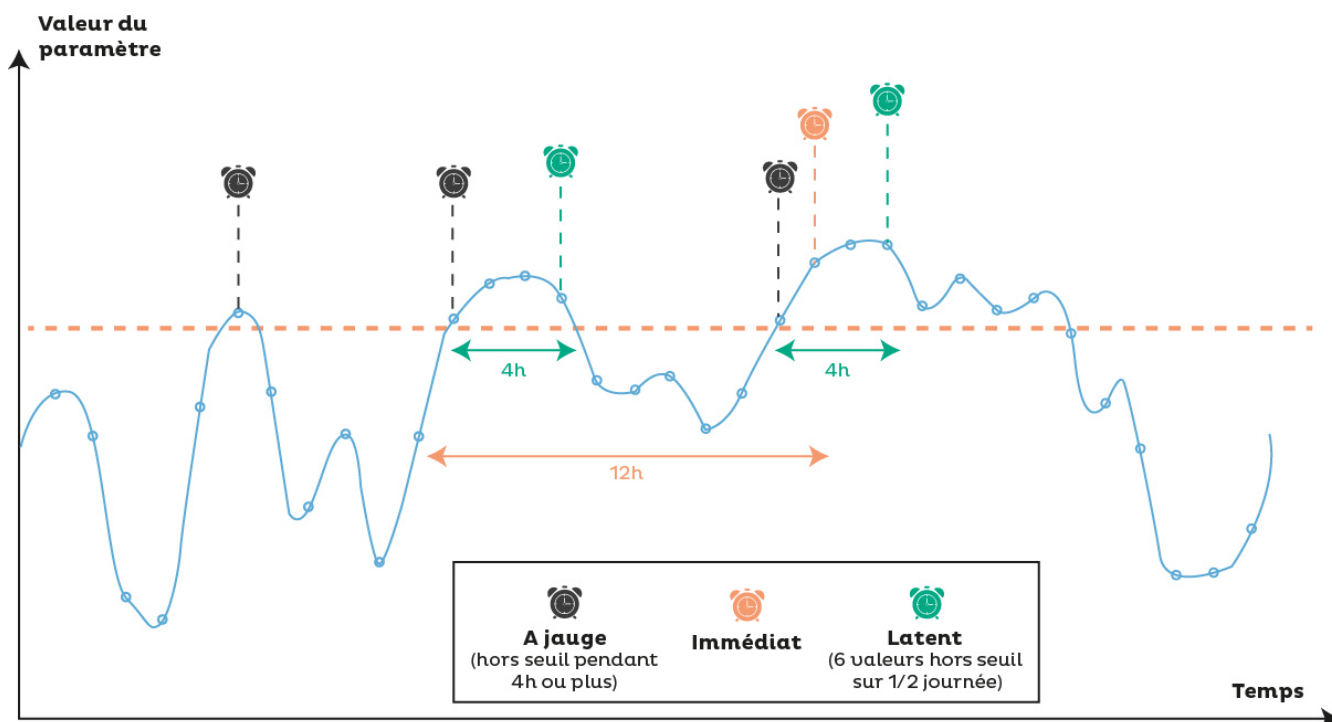
Le mécanisme qui provoquera le déclenchement de l'alarme va déterminer son comportement et aura évidemment un impact sur la couverture, le discernement et la performance de la surveillance.

On distingue 3 mécanismes de déclenchement d'une alerte :

- **Immédiat** : dès qu'une valeur est en dehors des seuils
- **A jauge** : l'alarme se déclenche quand un nombre défini de valeurs sont successivement en dehors des seuils
- **Latent** : l'alarme se déclenche quand un nombre minimum de valeurs sont en dehors des seuils sur une période d'observation donnée

Il est aussi possible de **cumuler ces approches avec des seuils différents pour chacun des mécanismes**. Mais également de conditionner une alerte à une combinaison des déclenchements sur différents paramètres.

Un déclenchement immédiat a l'avantage d'être simple à mettre en œuvre et facilite la gestion de l'évolution de l'alarme. L'alarme sera également extrêmement réactive, comme illustré ci-dessous, et assurera une meilleure couverture. On devine toutefois que le risque de fausses alarmes sera plus important (mauvais discernement) qu'avec un comportement à jauge ou latent.



Exemple de mécanismes de déclenchement d'une alarme

A l'inverse, **une alarme à jauge, ou latente, sera certes moins réactive** (elle détectera une défaillance plus tardivement, ce qui peut être problématique pour certains équipements critiques pour lesquels une grande réactivité est nécessaire), **mais l'utilisateur aura moins de doutes sur la pertinence de l'alarme** lorsqu'elle apparaîtra. Ce comportement est particulièrement intéressant lorsque le signal suivi n'est pas stable et varie d'une mesure à l'autre. Il peut aussi néanmoins complexifier la gestion de l'évolution de l'alarme et la vérification de la bonne réalisation de l'opération de maintenance.

critère (10 valeurs consécutives < 9,7 bars), alors l'exploitant devra attendre au moins 10 heures avant que celle-ci se désactive au meilleur des cas. Si ce n'est pas le cas, il devra retourner en urgence sur site le lendemain pour effectuer une nouvelle opération et l'équipement restera donc plus longtemps indisponible.

En effet, prenons un exemple fictif d'une surveillance à jauge de surpression en sortie d'un poste de détente de gaz, qui se déclenche quand 10 valeurs de pression aval consécutives dépassent les 9,7 bars. En imaginant que ces valeurs soient mesurées toutes les heures et que l'alarme se désactive sur le même

Gestion de l'évolution de l'alarme

Lors de la conception d'une alarme, on a souvent tendance à oublier ou négliger la gestion de son évolution, c'est-à-dire sa désactivation, ou son maintien. Il s'agit pourtant d'un point essentiel à ne pas délaissier, sous peine de crouler sous un nombre important d'alarmes et/ou de ne plus savoir si une alarme encore active est justifiée, c'est-à-dire si le défaut a été traité ou a disparu.

De nombreux choix pour gérer l'évolution de l'alarme s'offrent aux développeurs. Le plus simple consiste à **utiliser les mêmes critères que pour son activation** (même seuil, même paramètre surveillé et même mécanisme) **et de vérifier que ces**

conditions ne sont plus remplies pour désactiver l'alarme, ou la maintenir dans le cas contraire.

Ce choix est simple et a l'avantage de ne pas permettre de conflit entre les conditions d'activation et de désactivation d'une alarme.

En effet, si l'on choisit de désactiver l'alarme sur des critères différents (seuils, paramètre, mécanismes, ...), il peut arriver que les 2 conditions d'activation et de désactivation de l'alarmes soient remplies simultanément. Ceci n'est pas toujours identifiable et prévisible lors de la conception, surtout lorsque les critères sont complexes (seuils dynamiques, surveillance de plusieurs paramètres, alarme latente, ...).

On peut toutefois choisir des critères de désactivation et de maintien différents, si la conception de l'alarme est bien faite.

Ceci permet par exemple :

- De proposer une sortie d'alarme réactive / rapide (peut-être utile pour vérifier rapidement que l'acte de maintenance a été bien exécuté) ou plus lente
- De ne permettre la désactivation de l'alarme que sur des critères bien spécifiques
- D'avoir des conditions d'activation et de désactivation indépendantes

Inhibition de l'alarme

Enfin, il faut également **réfléchir aux critères d'inhibition de la surveillance et de son alarme.** D'un point de vue opérationnel, l'utilisateur va en avoir besoin lorsqu'il effectuera des actes de maintenance afin d'éviter d'éventuelles fausses alarmes.

De plus, la surveillance peut également ne plus être nécessaire dans certaines conditions de fonctionnement.

Dans certains cas, il peut même être utile de pouvoir la mettre en sommeil pendant quelques temps, afin de se focaliser sur les autres alarmes et de vérifier si elle se maintient après ce temps de sommeil.

Pour finir, **l'inhibition peut également servir à limiter le nombre d'alarmes reçues par l'utilisateur.**

Par exemple, si une alarme est déjà présente, d'autres peuvent également se déclencher en lien avec la même défaillance qui a déclenché la première, sans valeur ajoutée.

4. Prescrire ce qui doit être fait

Concrètement, cette étape doit répondre à ces questions :
qui fait quoi, comment et quand ?

Derrière ces questions simples, d'apparence, se cache en fait toute l'organisation de l'exploitation et du maintien de la solution.

Pendant cette étape, il faut se poser sans arrêt ces questions. Il conviendra de **définir plusieurs aspects, tels que :**

- Qui / quoi assure la surveillance et l'analyse des données ? (opérateur humain, système automatisé, autre ?)
- Doit-on notifier quelqu'un en cas d'alarme ?
 - **Si oui**, sous quel format notifie-t-on et quel contenu y mettre ?
 - **Si non** : l'utilisateur doit-il se connecter régulièrement pour vérifier l'état de son parc d'équipements ?
- Doit-on notifier à chaque alarme ou envoyer un récapitulatif hebdomadaire / mensuel des alarmes ?
- En cas d'alarme, quelqu'un doit-il vérifier les données ou aller se rendre sur place pour valider qu'il s'agit bien d'une défaillance ?
- Si la défaillance est invalidée, que faire pour éviter que cela se reproduise et améliorer la surveillance (modifier les seuils, le mécanisme de l'alarme, ...) ?
- Si la défaillance est validée, qui décide de l'action de maintenance à mettre œuvre ?
- Dans quel outil renseigne-t-on la défaillance et l'action de maintenance ?
- Qui planifie l'intervention de maintenance ? Dans quel outil ?
- Qui effectue l'acte de maintenance ?
- Qui renseigne les informations sur la réalisation de l'intervention et le reste à faire ? Dans quel outil ou à qui sont-elles envoyées ?

A l'instar de chaque solution de maintenance conditionnelle développée, chaque organisation associée à son exploitation est unique. Les possibilités sont nombreuses ...



5. Conduire le changement

[Voir Industrialisation, page 53.](#)

La maintenance conditionnelle est disruptive pour les métiers mais aussi l'organisation. Elle entraîne de nombreux changements tant au niveau individuel (pratiques métiers, outils, responsabilités), qu'au niveau global (processus, organisation, effectifs). Une conduite du changement efficace doit donc être mise en place pour accompagner à la fois au niveau individuel chaque personne impactée, mais aussi au niveau global l'organisation et les processus impliqués (voir la Figure ci-dessous).

L'accompagnement doit être fait au niveau individuel, pour s'assurer de la maîtrise des nouveaux gestes, mais aussi au niveau global, pour s'assurer de l'adéquation de l'organisation, des effectifs et processus.



Nouveaux gestes métiers et outils

- Définir les seuils
- Confirmer les alertes en analysant les données et décider des actions à mener
- Valider l'intégrité et la qualité des données utilisées pour l'apprentissage des modèles
- Identifier des déviations de la solution et proposer des suggestions d'amélioration
- Savoir agir au bon moment (ne pas intervenir dès qu'un indicateur n'est pas au vert)



Organisation et processus nouveaux

- Définir de nouveaux rôles
- Définir des rituels (internes, inter directions, ...)
- S'interfacer avec des nouveaux métiers (Data Scientist, Développeur, Experts,...)
- S'assurer de l'adéquation charge/ capacité (plan de recrutement, mobilités internes)
- S'assurer de l'adéquation compétences / requis (formations, référents métiers, ...)

La conduite du changement permettra de faciliter l'acceptation et l'intégration de la solution, afin de tirer les meilleures performances de son exploitation. Pour être efficace, elle devra au moins :

- Prévoir des communications auprès de l'ensemble des parties prenantes pour expliquer la valeur de la nouvelle solution et de l'organisation associée
- Faciliter la bonne prise en main de la solution (via des séances de formation, des guides utilisateurs) et l'autonomie des utilisateurs (former et nommer des référents)
- S'assurer de la bonne acceptation et utilisation de la solution (questionnaires de satisfaction, suivi d'indicateurs), ainsi que de la bonne compréhension des nouveaux gestes métier
- Permettre de capter les difficultés pour, si nécessaire, revoir l'organisation ou la solution (questionnaires, suivi des retours terrains, ...).

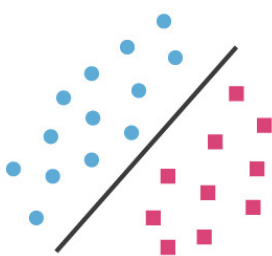
Exemples de difficultés à adresser lors de la conduite du changement :

- La surveillance des alarmes est chronophage et n'est pas priorisée par le management
- Le suivi entre collaborateur n'est pas fait (qui a fait quoi sur quelle installation ?)
- Les collaborateurs ne savent pas utiliser la solution (manque de formation)
- Les opérations déclenchées suite à la détection de défaillances ne sont pas priorisées
- L'opérateur qui intervient sur l'installation ne sait pas ce qu'il doit faire (d'habitude il intervient pour une maintenance corrective ou systématique bien décrite dans les process)
- L'analyste n'obtient pas de retour du terrain et ne sait pas si sa préconisation était pertinente

03 Mise en exploitation des algorithmes prédictifs

1. Conception des algorithmes prédictifs

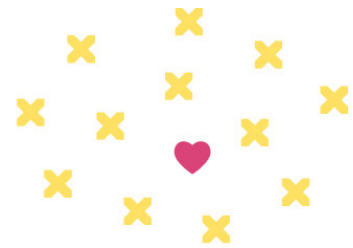
D'un point de vue théorique, les algorithmes les plus souvent utilisés pour résoudre de problèmes de maintenance prévisionnelle correspondent à des tâches de classification, de prévision d'un comportement futur ou de détection d'anomalies (voir les exemples ci-dessous).



Classification



Prévision de comportement futur



Détection d'anomalies

Exemple de différentes typologies de tâches utilisées dans l'apprentissage automatique

Au cours des phases de conception, un ensemble de données historiques est utilisé pour entraîner et tester les algorithmes afin de sélectionner ceux qui sont suffisamment performants pour être déployés (Aujourd'hui, on privilégie les méthodes ensemblistes qui consistent à donner une prévision

à partir de plusieurs modèles agrégés. Ces méthodes sont réputées plus robustes que les méthodes avec un modèle unique.). **Cette étape est itérative et elle consiste à tester différentes combinaisons de variables** (paramètres ou "features") avec différentes configurations et

paramétrages d'algorithmes (voir Tableau ci-dessous).

Elle permet d'identifier les paramètres pertinents pour l'identification ou le suivi de la dégradation, et s'arrête quand les algorithmes ont atteint une performance cible, définie en début de projet (Il est très important de définir une performance cible cependant il s'avère souvent difficile pour les commanditaires de formuler leurs attentes.).

Type d'apprentissage	Cas métier	Méthode	Exemples d'algorithmes
Apprentissage supervisé	Suivi temporel d'une grandeur (vibration)	Modélisation du comportement sain : régression multivariée sur les paramètres d'influence basée sur des données historiques de fonctionnement sain. Identification d'anomalies par écart entre mesure réelle e modèle. Définition du seuil en exploitant des données historiques avec défaillance.	KNN Régression linéaire/ polynomiale
Apprentissage supervisé	Calcul du risque de défaillance à une échéance fixée	Classification/ régression Estimation de la probabilité/niveau de risque d'occurrence d'une défaillance sur une période future donnée. Modèle entraîné sur un échantillon de données saines ainsi que de défaillances comportant des facteurs inducteurs a priori.	Random forest / XG Boost Régression logistique KNN SVM
Apprentissage non-supervisé	Identification des modes de fonctionnement normaux et anormaux fonctionnement normaux et anormaux	Classification Segmentation automatique des données en cluster permettant d'isoler les comportements inhabituels	Kmeans CAH DBscan

Type d'apprentissage	Cas métier	Méthode	Exemples d'algorithmes
Apprentissage supervisé	Temps restant avant défaillance – approche régression	Régression Estimation du temps restant avant la défaillance par régression sur des données historiques de fonctionnement avant défaillance	Random forest / XG Boost Régression linéaire
Apprentissage non supervisé	Identification des variables à enjeux	Classification/ hiérarchisation des différentes variables d'un modèle en fonction de leur impact sur le paramètre à prédire (ex : occurrence d'une défaillance, temps avant défaillance, grandeur physique suivie...)	Shapley LIME Xgboost Random forest PCA

Exemples d'algorithmes classiquement utilisés dans les solutions de maintenance conditionnelle ou prévisionnelle

2. Mise en production des algorithmes prédictifs

Une fois la faisabilité prouvée, il est nécessaire de se poser la question de son fonctionnement :

- Quelles données vont être utilisées ?
- Dans quel(s) système(s) sources va-t-on les chercher ?
- Comment peut-on les récupérer ?
- Où est-ce qu'on va héberger les algorithmes ?
- A quelle fréquence va-t-on les exécuter ?
- Où vont être envoyés les résultats ?
- Comment va-t-on les restituer à l'utilisateur ?

Toutes ces questions expliquent la raison pour laquelle l'opérationnalisation des systèmes de maintenance prévisionnelle peut s'avérer coûteuse.

3. Maintenance des algorithmes prédictifs

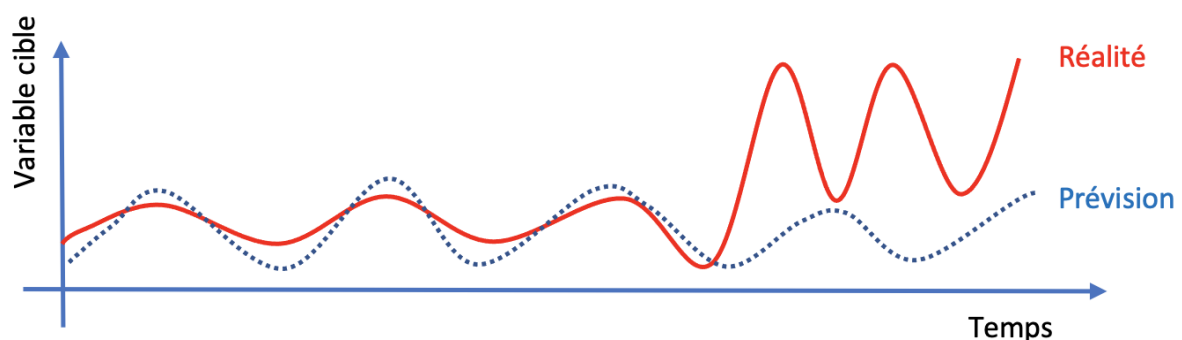
Lors de la mise en service opérationnelle, les algorithmes sont entraînés avec les dernières données disponibles qui doivent être à l'image de celles présentes en production (Cette condition paraît évidente mais elle n'est pas forcément garantie.).

Dans ce fonctionnement, on prend implicitement l'hypothèse qu'à l'avenir le système va se comporter de la même manière qu'il se comportait dans le passé. Or, dans la réalité cette condition n'est pratiquement jamais vérifiée. **Les appareils et systèmes surveillés sont sujet aux évolutions dues à leur environnement physique, aux conditions météorologiques, au vieillissement des matériaux etc.**

Il est évident qu'un système prédictif qui est construit et se base sur les données historiques peut devenir obsolète s'il n'est pas maintenu et mis à jour régulièrement. Donc, **un système prédictif nécessite lui-**

même une surveillance et une maintenance pour garantir une performance sur le long terme. C'est une problématique forte pour les modèles basés sur la donnée : dès qu'on a un changement d'un composant / mode de fonctionnement / voir calibration de capteur, alors les modèles ne sont plus représentatifs et il faut les réentraîner, parfois avec un long historique. Cela implique que la surveillance peut être longtemps indisponible après ce type d'événement, et qu'il y a un coût systématique à chaque remise en service.

En absence de ce type de procédure, on peut observer que les prévisions s'écartent progressivement de la réalité, c'est ce qu'on appelle dans la théorie de l'apprentissage « **la dérive conceptuelle** » (concept drift) – voir l'exemple ci-dessous.



Exemple de dérive conceptuelle

Que faut-il faire pour éviter cet écueil ?

Dans la plupart des cas, la réponse à ces problématiques est **un réapprentissage fréquent du modèle prédictif** qui consiste à utiliser un jeu de données plus récent pour le reparamétrer. Il y a néanmoins le **risque de réapprendre sur une anomalie naissante, au risque de la masquer.**

Si l'on assiste à un changement de comportement radical, une refonte totale du modèle peut se montrer nécessaire. Ce choix reste donc de la responsabilité du métier en

considérant les risques de lancer ou non un réapprentissage. De plus ces deux opérations ne garantissent pas de récupérer la performance initiale du modèle.

Peu d'outils informatiques industriels existent pour les traiter d'une façon automatique ou semi-automatique ces problématiques.

Mais il s'agit d'un domaine de recherche très actif ces dernières années, il n'est donc qu'une question de temps que les solutions clé en main voient le jour.



06.

Comment mener un projet de maintenance conditionnelle ?



La conception d'une solution de maintenance conditionnelle est complexe, longue, et son aboutissement n'est pas garanti. Pour maximiser les chances de réussite d'un tel projet, **une équipe dédiée doit être mise en place et le projet doit être séquencé en plusieurs étapes.**

Afin de limiter le risque et la dépense, un projet est séquencé en étapes durant lesquelles on vérifie que les conditions pour passer à la suivante sont réunies.

01 Équipe projet

Une équipe projet est une équipe éphémère dédiée à la gestion d'un projet. **Elle s'articule autour de rôles centraux que sont le chef de projet et le sponsor** (le client du projet ou son représentant). L'équipe doit être transverse et impliquer les collaborateurs possédant les connaissances et compétences nécessaires à la réussite du projet, mais aussi des utilisateurs cible de la solution à développer.

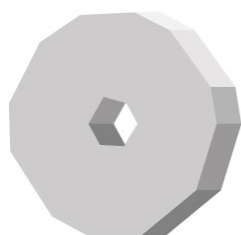
Pour le cas de la maintenance conditionnelle à GRTgaz, les exploitants et experts métiers sont des collaborateurs incontournables.

En effet, leur contribution s'avérera indispensable pour identifier les paramètres utiles et comment les analyser. Ils guideront aussi le projet pour développer une solution répondant au mieux aux besoins opérationnels et qui pourra s'intégrer dans les pratiques, processus et organisations de l'entreprise.

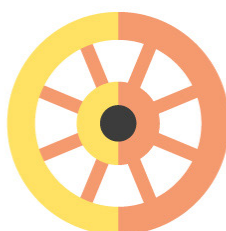
De plus, l'équipe projet doit obligatoirement inclure des personnes ayant une connaissance des données, mais aussi du domaine fonctionnel du futur applicatif.

02 Structure et séquencement d'un projet

Un projet de maintenance conditionnelle est séquencé en **3 étapes**, où la **faisabilité, le périmètre et la complexité de la solution** évoluent, comme illustré ci-dessous. Dans un premier temps, on vérifie la faisabilité de la solution via un **POC** (Proof of Concept). On met ensuite en place un pilote, également appelé **MVP** en anglais (Minimum Viable Product), puis on termine par une **phase d'industrialisation / déploiement** de la solution.



Classification



Prévision de comportement futur



Détection d'anomalies

Les différentes phases d'un projet de maintenance conditionnelle

1. Proof Of Concept : POC

Le POC doit répondre à la question suivante : est-on capable de mettre au point une solution répondant aux besoins, tout en atteignant une performance cible, fixée à l'avance ? Pour cela, on vérifie certains prérequis, à savoir :

- La présence des données
- La qualité des données
- La faisabilité technique de la solution : démonstration théorique ou démonstration par la pratique et test de certaines fonctionnalités sur un petit périmètre
- Le respect de KPI fixés en début de projet

A la fin de cette étape, on ne dispose pas encore d'un outil fonctionnel. Les expériences de nombreux industriels montrent que **lors du passage du POC au MVP ou à la phase d'industrialisation, nombre de projets échouent**, faute de faisabilité technique ou à cause d'une mauvaise conception du cas d'usage qui s'avère inutilisable dans la pratique.

2. Minimum Viable Product

Afin de s'assurer que le futur système est utilisable dans la pratique, il convient ensuite de construire un prototype ou MVP. Celui-ci permet d'effectuer **un test grandeur nature de l'utilisation du système** sur une partie du périmètre cible pendant une durée limitée. Pour limiter le risque et la dépense, le prototype se contente d'un fonctionnement rudimentaire avec les fonctionnalités de base et peu ou pas du tout d'interface graphique, ni d'automatisation de flux de données.

Cette phase est importante car elle doit aussi permettre **d'évaluer la valeur du projet pour l'entreprise** et **d'affiner le ROI** (retour d'investissement). A la fin de la période d'observation, les utilisateurs doivent être capables de se prononcer pour ou contre une mise en application sur l'ensemble du périmètre fonctionnel.

3. Industrialisation

La phase d'industrialisation est un projet à part entière. Elle vise à **concevoir l'outil final et à le déployer sur l'ensemble du périmètre cible**.

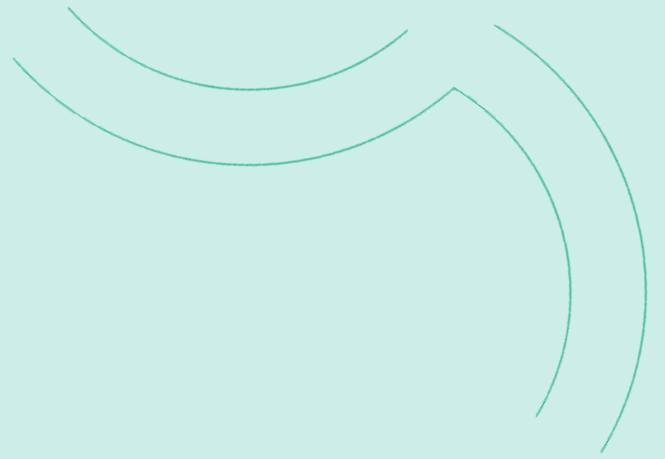
Les briques construites durant les phases de POC et prototype ne sont en règle générale pas réutilisables en l'état. Il est nécessaire d'adresser l'ensemble des points décrits dans le paragraphe précédent et aussi

de traiter l'expérience utilisateur, là où en phase pilote on pouvait rester sur des fonctionnements en mode ligne de commande ou d'exécution sommaire d'algorithme.

Dernièrement, la phase d'industrialisation est un vecteur de changements pour les utilisateurs finaux de la solution. En effet, le déploiement d'un outil ou d'une solution va entraîner des changements organisationnels, apporter de nouvelles fonctions et responsabilités à un corps de métier, ou encore changer des pratiques métiers. C'est pour cela qu'**une conduite du changement doit accompagner cette phase critique** ([voir Conduire le changement, page 45](#)).



07.



Organisation



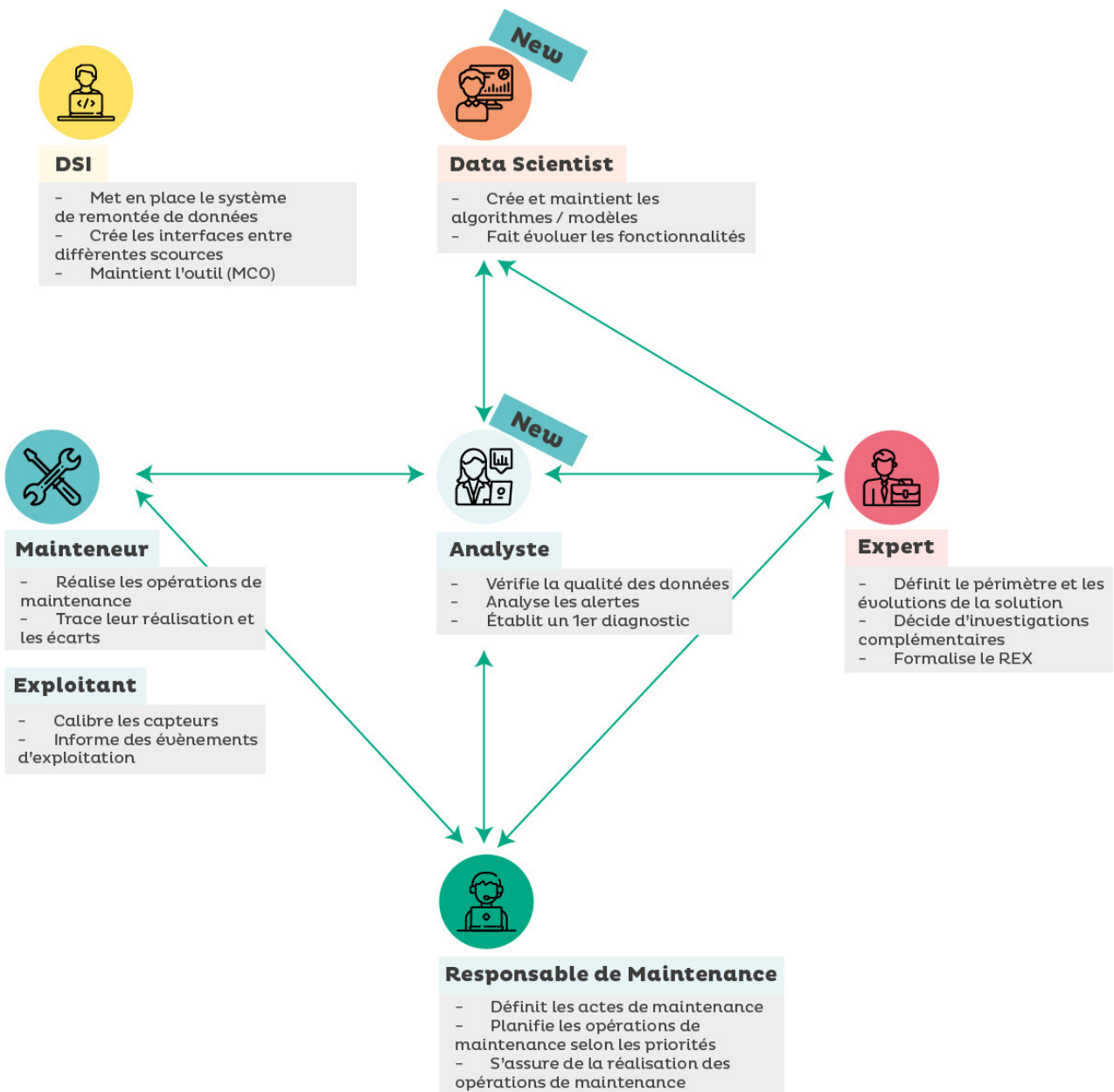
01 Les différents rôles

Comme indiqué dans [Prescrire ce qui doit être fait, page 44](#), pour chaque solution de maintenance conditionnelle développée, chaque organisation associée à son exploitation est unique.

Néanmoins, il est possible d'identifier des rôles et définir une organisation de base qui peut être ajustée au besoin. La figure ci-dessous présente les différents rôles associés au déploiement et à l'exploitation d'une solution de maintenance conditionnelle.

Une des principales variables d'ajustement concerne l'attribution des rôles. Ainsi, une même personne peut assumer plusieurs rôles suivant ses compétences, l'organisation et les enjeux. Un même rôle peut-être aussi être assumé partiellement par plusieurs personnes distinctes (ex : l'expert ou l'exploitant qui fait l'analyse des alertes).

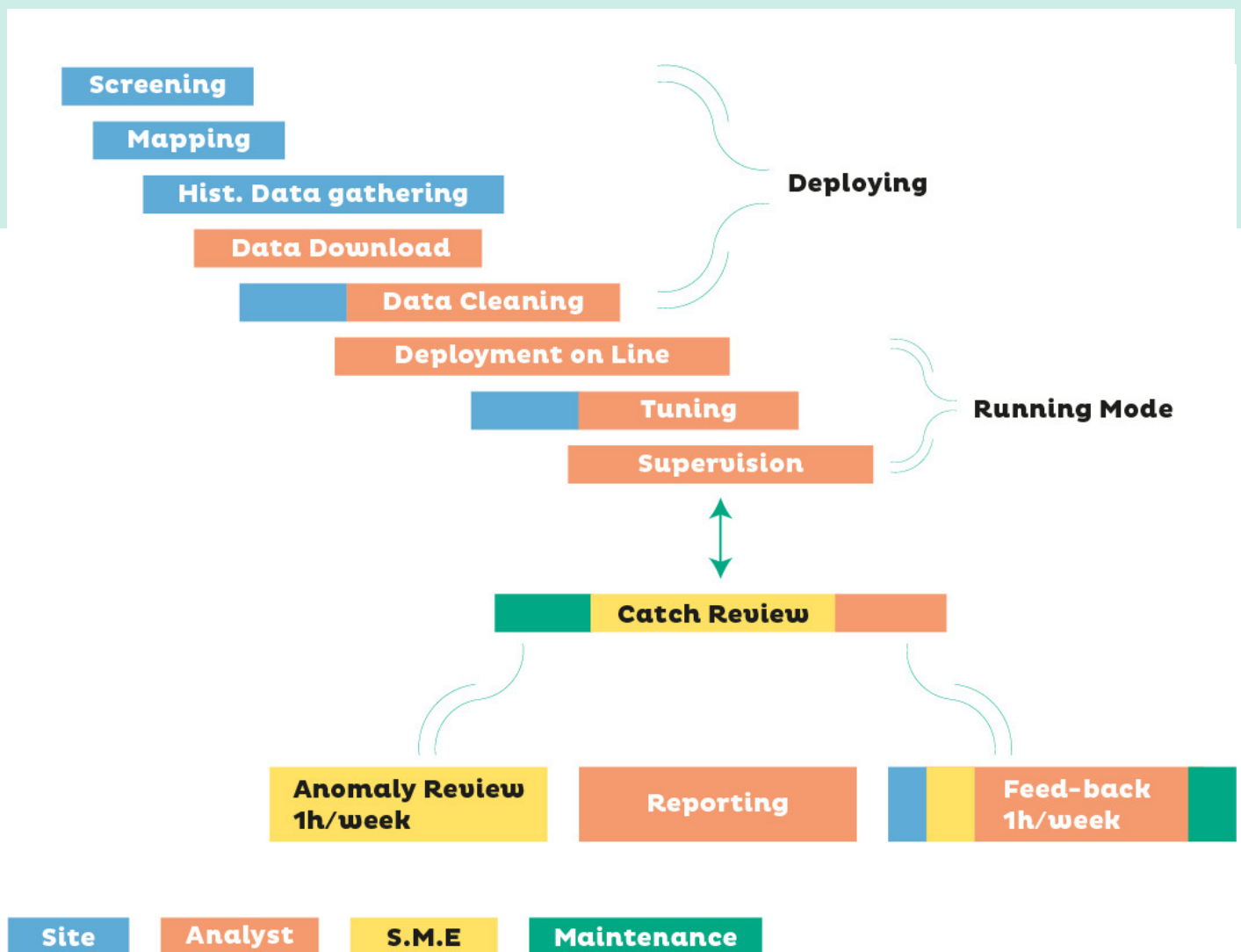
Il peut être utile d'organiser des rituels périodiques ou au cas par cas avec ces différents pour partager les analyses des alertes (voir exemple air liquide : « catch review »).



Les rôles clés génériques pour développer, exploiter et maintenir une solution de maintenance conditionnelle

A titre de comparaison et d'exemple, la maintenance conditionnelle chez Air Liquide gravite autour de 4 principaux rôles, comme illustré ci-dessous :

- L'Analyste (Analyst), qui assume également le rôle du Data Scientist, au sein d'une équipe centralisée
- L'Expert (SME), qui assume également le rôle du Responsable de Maintenance
- L'Exploitant (Site)
- Le Mainteneur (Maintenance)



Les rôles clés pour développer et exploiter une solution de maintenance conditionnelle (Air Liquide, Conférence ASME Turbo Expo, Houston, 2019)

02 Faire ou faire faire

Tous les industriels qui utilisent la maintenance conditionnelle ont été confrontés aux questions suivantes :

- Faut-il gérer cette activité entièrement par soi-même ou l'externaliser (partiellement voire complètement) ?
- Et comment la sous-traiter / l'externaliser ?

Il existe différentes manières de **sous-traiter une activité de maintenance conditionnelle**. En effet, on peut choisir d'**externaliser une phase entière** comme le développement, l'exploitation ou la maintenance de la solution de maintenance conditionnelle. On peut également **déléguer certains rôles** pendant toute une phase ou tout le cycle de vie de la solution.

Comme indiqué dans le Tableau ci-dessous, les motivations sont variées et dépendent évidemment des enjeux, des compétences, de l'organisation, des priorités ou encore des orientations stratégiques de chaque entreprise / industriel.

Motivations	Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none">- Manque de compétences- Complexité des développements- Organisation non adaptée- Orientation stratégique	<ul style="list-style-type: none">- Profiter d'une expertise- Profiter d'un benchmark externe- Rapidité des développements / mise en œuvre- Mise en concurrence et compétitivité des services	<p>Global</p> <ul style="list-style-type: none">- Possibles problèmes de sécurisation des données- Perte d'expertise sur les équipements <p>Développements / Exploitation</p> <ul style="list-style-type: none">- Fonctionnement en mode boîte noire : le fonctionnement du logiciel est inaccessible- Coûts de licence

Motivations, avantages et inconvénients à l'externalisation de la maintenance conditionnelle

08.



Perspectives



Les concepts traditionnels de maintenance systématique ou corrective sont peu à peu complétés par une prise en compte plus proactive des défaillances.

Les industriels tendent à renforcer leur capacité à anticiper les défaillances afin de recourir à des actions préventives les plus fines possibles dans l'objectif de réduire les coûts et les risques. La plupart des industriels qui font de la maintenance conditionnelle ont déjà développé des solutions sur leurs actifs les plus critiques : une bonne partie des cas d'usages qui dégagent de la valeur pour eux (sécurité, disponibilité, coûts, ...) sont en service, bien que des opportunités nouvelles peuvent encore apparaître avec l'arrivée d'équipements récents mieux instrumentés.

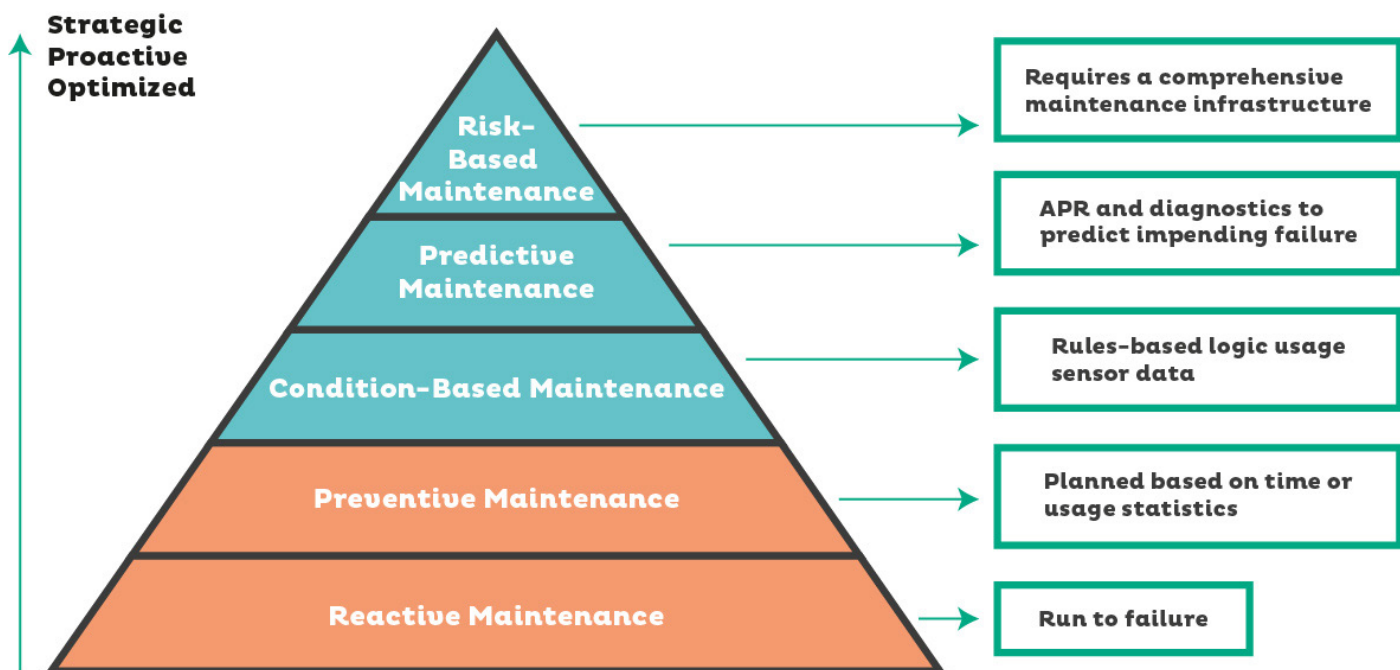
Les industriels comme les fournisseurs de logiciels, poursuivent des études sur la maintenance conditionnelle prévisionnelle, de manière à estimer le **temps restant avant la panne** (appelé RUL) qui permettra de planifier au juste besoin les interventions de maintenance, comme décrit dans le [paragraphe 1.1.2.b](#), avec les difficultés évoquées (reproductibilité des défaillances et quantité de données nécessaires pour l'apprentissage).

Par ailleurs, les industriels travaillent à **l'automatisation de la surveillance** (analyse des données, diagnostic/pronostic) pour fournir une prescription sur les actions à mener après une alerte (maintenance prescriptive, qui consiste à suggérer des interventions

de maintenance en fonction de la panne constatée ou anticipée). Par la suite ces prescriptions pourraient être intégrées automatiquement dans les plannings d'intervention en cherchant à optimiser/mutualiser les interventions afin d'alléger la charge des équipes et de réduire l'indisponibilité des actifs pour maintenance.

Enfin **L'Asset Management, méthode de gestion des actifs**, prend une place croissante dans les décisions de maintenance (indisponibilisation, bridage, réparation ou renouvellement de matériel). En effet elle vise à **optimiser les dépenses** sur toute la durée de vie de l'actif, tout en maîtrisant les risques. La connaissance fine de l'état de santé de chaque sous-système, ainsi que du niveau d'utilisation, de l'environnement et des enjeux de chaque actif rend possible une **maintenance «personnalisée»**, même sur une flotte d'actif du même type. Ceci ne peut être atteint qu'en réussissant à croiser un grand nombre de données issues de différentes parties de l'entreprise, défi auquel s'attaque différents industriels.

Une représentation classique de ce cheminement est **la pyramide de la maturité en maintenance**. A noter que **le sommet de la pyramide était généralement «reliability centered maintenance»** (RCM) – soit maintenance basée sur la fiabilité – est maintenant remplacé par le **«risk based maintenance»** (RBM), qui ne se concentre plus uniquement sur la disponibilité de l'actif et est donc en phase avec l'approche asset management.



Pyramide de la maturité de la maintenance (Pathak, 2018)

GRTgaz

Jusqu'à présent, les **critères de disponibilité et de sécurité des équipements** étaient privilégiés chez GRTgaz dans la conception des programmes de maintenance. Cependant cette politique évolue pour **optimiser d'avantage les coûts et développer l'asset management.**

Une réflexion a déjà été lancée sur la plupart des actifs critiques de l'entreprise sur **l'opportunité de mettre en place des solutions de «maintenance prédictive».** Cependant l'analyse de la valeur

ont montré que le bénéfice n'était pas toujours supérieur aux coûts engendrés par le développement et le maintien en condition opérationnelle des solutions. En effet, **les enjeux financiers autour de la maintenance conditionnelle pour GRTgaz sont moindres que pour d'autres industries,** notamment en raison de :

- La forte redondance de ses équipements critiques
- La réglementation qui impose certains types de maintenance et leur fréquence

Les entreprises qui vont tirer le plus de gains de ce type de maintenance sont des producteurs de biens ou d'énergie qui peuvent **éviter des pertes de production** qui ont un impact financier majeur.

Néanmoins **l'arrivée de nouveaux équipements associés aux nouveaux gaz va donner de nouvelles opportunités de développement de solution de maintenance** avancée. De plus, en gagnant de la maturité sur l'asset management, des perspectives s'ouvrent sur une **maintenance «différentiée» par actif,** qui prendra en compte l'état de santé des équipements et leurs enjeux.

Livre Blanc « Maintenance Prédicitive »

Rédaction :

Marketa Pichloua Lallementoua, François Libeyre, Clément Pottelette

Direction des Systèmes d'Information, GRTgaz
Florent Brissaud, Amel Belounnas, **RICE**

