

Maintenance 4.0 et +

1. Constats

Que veut dire la **Maintenance 4.0** ? Ce serait logiquement la suite de la Maintenance 1.0, 2.0, 3.0, mais qui a vu ces évolutions dans les 10 dernières années, où sont les définitions !!!

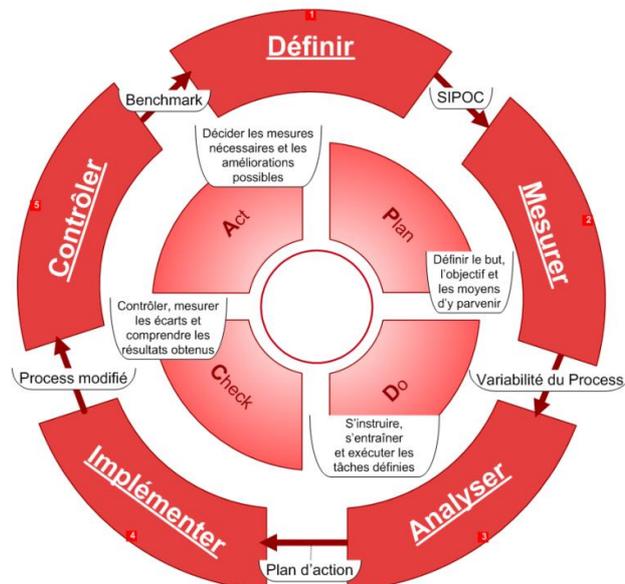
Toute personne en ayant vu un OVNI de ce genre et est capable de décrire les niveaux est toujours le bienvenu dans mon blog....

C'est une mouvance lente mais continue dans l'**Industrie 4.0**, cependant assez logique, car la **Robotisation et l'Automatisation** des grandes entreprises propulsent la fonction **Maintenance au rang prioritaire**, car dans certains ateliers, il n'y a presque plus d'Exploitants physiques sur place..

Et donc elle devient une **fonction Majeure !!** Alors qu'**UN** grand nombre d'Entreprises considèrent encore la Maintenance comme faisant partie des frais généraux qui coûtent, alors que c'est une source de **Profits**¹.

Plusieurs méthodes majeures permettent d'identifier et de réduire les pertes dans les Entreprises :

1. Le **Lean** (Manufacturing et Transactionnel) traitant sur la réduction des pertes de toutes sortes sur le Gemba avec comme base la conception d'une **VSM**²
2. **6 Sigma** traitant de la variabilité des processus en réduisant le nombre des **ppm**³ avec la démarche **DMAIC**⁴ et mettre au rencart le **PDCA** des années 70, qui ne contient que des bonnes volontés de faire mais sans Méthodes ni Outils pour y arriver.



¹ Se rappeler d'un excellent ouvrage « La maintenance, Source de Profit » parus aux Éditions d'organisation dans les

² Value Stream Mapping

³ Partie Par Million de défauts produits

⁴ Définir, Mesurer, Analyser, Innover, Contrôler

3. **La performance Énergétique** par la mesure précise des consommations électriques par zones, par usage, par tranches de temps, par nature, etc.. **QUALISTEO**⁵ a en plus une approche d'analyse de la qualité de l'électricité produite selon les normes EN50160
4. **MAXER**⁶ (Méthode de Résolution de problèmes, de Diagnostic, d'Analyse et de Fiabilisation), pour traiter les déviations brutales.
5. **Et d'autres bien entendu..**

2. Évolutions dans le domaine de la Maintenance

Que s'est-il passé depuis le début des années 70 dans le domaine de la Maintenance ? :

- L'apparition des premières **GMAO**, des vraies !!!
- La disponibilité des premiers appareils de **CND**⁷ (Contrôles non Destructifs) où **IND**⁸ de plus en plus petits, performants, mais considérés par certains comme des moyens sur étagère, qu'on utilise de temps de temps, mais pas complètement intégrés dans les Plans de Maintenance Préventifs Prévisionnels
- Des Méthodes d'organisation venant du Japon, comme la **TPM**, aujourd'hui un peu dépassée dans sa mise en œuvre globale. On ne retient qu'aujourd'hui les **5S** que l'on trouve également dans les outils du **Lean**, le premier niveau de Maintenance réalisé par les Opérateurs, mais on oublie de les former au premier niveau de Diagnostic (**MAXOPERA**⁹)
- Il n'a pas été retenu à l'époque, une méthode de résolution de problème, la Méthode **PM (Physical, 5M)** qui était complexe à mettre en œuvre, car elle ne possédait pas la représentation de la Chaîne Causale, le **Défailligramme** comme dans la Méthode **MAXER**¹⁰ **Franco Française !**

Nota : Aujourd'hui, l'efficacité en Production passe, en plus du premier niveau de Maintenance, par la formation des Opérateurs au premier niveau du Diagnostic, afin de les intégrer dans le processus de Diagnostic et les faire participer avec les techniciens de Maintenance au processus de recherche de la **Cause de la panne**¹¹ et ce le plus rapidement possible.

3. Éléments utiles à la mise en place d'une politique de Maintenance 4.0

Les solutions **Méthodologiques et Outils** suivants sont utiles pour réussir une mise en œuvre d'une politique de **Maintenance 4.0** (sans papier), mais pas tous forcément tous indispensables...:

⁵ Efficacité Énergétique QUALISTEO Benjamin NICOLLE | Partnerships Manager,

☎ 33(0)9 72 46 50 33 | 📠 33(0)7 52 03 95 83

⁶ Méthode de conception Française, de Diagnostic des Panne, d'Analyse et de Fiabilisation, datant des années 70 !!

⁷ Thermographie IR, Analyse des lubrifiants, Ultrasons pour les fuites et mesures d'épaisseurs,

⁸ Investigations Non Destructifs

⁹ Module de la formation MAXER (Diagnostic, d'analyse, Fiabilisation) pour les Opérateurs

¹⁰ Méthode de résolution de problèmes par le raisonnement

¹¹ On ne peut pas à ce stade identifier la Cause première, car cela fait l'objet d'une Analyse plus approfondie

- Les bases de données de Retour d'Expérience sur l'Analyse des Causes premières des événements transcrites en données exploitables (**DIAGDEF**¹²)
- Le Retour d'Expérience réalisé par des solutions sur la capitalisation de la connaissance comme les solutions et Méthodes d'**ARDANS**¹³.
- Des solutions basées sur les réseaux **Bayésiens**¹⁴ qui permettent de concevoir une base de données de Diagnostic au stade de la Conception par l'utilisation de l'**Intelligence Artificielle (IA)** et s'optimisant par l'apprentissage
- Des moyens de gestion de la Documentation Technique, les **GED**¹⁵
- Et le **Lean 6 Sigma**, ignoré royalement par la Maintenance qui n'a pas compris que la Variabilité existe partout, et en particulier dans ses propres processus... Et quand on parle de Moyennes, de Ratios (MTBF, MTBF), cela ne représente rien sans qu'on les accompagne de leurs **écarts types**, ce qui est rarement le cas.

L'apparition de **tablettes**, où on possède toutes les informations disponibles sur soi, évitant de faire des recherches pénalisantes qui font perdre du temps, avec l'historique des Comptes-rendus de la **GMAO**, sont un transfert d'information d'une base centralisée à une base mobile, mais qui n'amènent aucune **Valeur Ajoutée** sur la connaissance.

3.1 Première étape, la Modélisation

La première étape est de **Modéliser les équipements** sur lesquels une Politique de **Maintenance 4.0** a été envisagée.

Un des milieux les plus consommateurs de cette **Maintenance 4.0**, c'est celui des machines tournantes des équipements de production dans l'industrie, le tertiaire industriel ou l'immobilier (Bâtiments, Stades, ..).

Ces équipements industriels sont en général composés de quatre fonctions qui composent la chaîne cinématique :

1. **Les machines entrainantes** qui génèrent le mouvement tournant (Moteurs électriques, thermiques, turbines à vapeur, hydrauliques, etc.)
6. **Les systèmes d'entraînement**, (accouplements mécaniques, transmissions par courroies, réducteurs, pignons, etc.)
7. **Les machines entrainées** qui produisent la valeur Ajourée (Alternateurs, turbines, génératrices, broyeurs, compresseurs, supprimeurs, génératrices, pompes, ventilateurs, volants d'inertie, réducteurs, multiplicateurs,)
8. **Les accessoires** (Paliers, volants d'inertie, variateurs, freins, turbocompresseurs, etc.)

Tous ces ensembles sont souvent modélisés sous forme de chaînes cinématiques, mais malheureusement disponibles que sous forme papier, mais pas encore en CAO/DAO (sauf erreur de ma part).

Actuellement une centaines de configurations dont décrites, dont l'exemple¹⁶ ci-dessous :

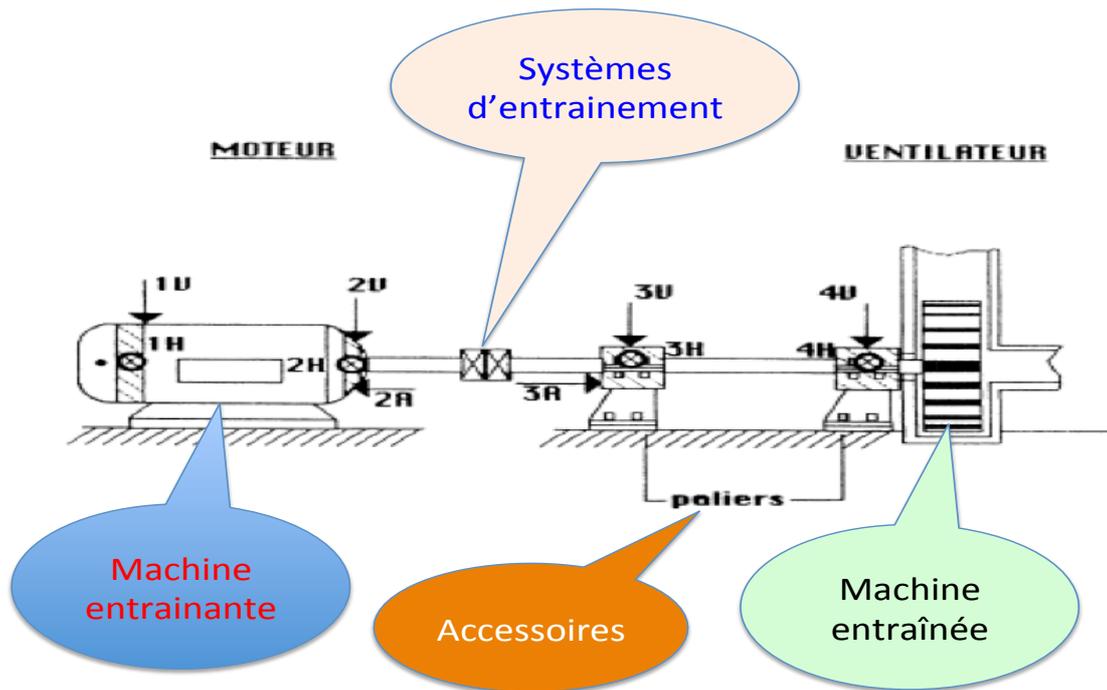
¹² Logiciel de conception du Défailligramme et de constitution d'une base de données de REX

¹³ Capitalisation de la connaissance avec le logiciel Knowledge Maker.

¹⁴ Proposé par la Société Bayesia www.bayesia.com

¹⁵ Gestion Électronique des Documents

¹⁶ Provenance LSS



3.2 Seconde étape, identification des Modes de Défaillances

Les solutions technologiques et informatiques qui nous sont proposées désormais (capteurs, logiciels d'IA, le BIG DATA), viennent bousculer les processus d'élaboration des Plans de Maintenance car désormais basés sur la surveillance des paramètres physiques en continu.

Quel problème risque d'apparaître ? Quel moyen d'Investigation Non Destructif, quel capteur choisir pour identifier quel phénomène physique à surveiller ?.

A part les capteurs classiques, qui existent depuis de longues années, Vibration, Température qui alimentent des alarmes sur des triggers, on a à choisir maintenant dans une bibliothèque importante de solutions technologiques.

Alors comment choisir ? Existe t-il une Méthode pour identifier à partir d'une installation, d'une ligne de production, des Modes de Défaillances, les phénomènes physiques et les capteurs à utiliser ??

Et bien oui !!

De nouvelles méthodes et bases de données sont à adapter et/ou à concevoir ou reconcevoir ;

- ✓ La conception des diagnostics prévisionnels sur la base des défaillances potentielles traitées par des réseaux **Bayésiens**¹⁷,
- ✓ Sur la base de la Méthode **OPTIMAC**¹⁸, (Méthode basée sur l'utilisation des Méthodes d'investigations non destructives classiques), la conception d'une nouvelle méthode qui prendra en compte désormais, les capteurs connectés, **MICMAP**¹⁹
- ✓ **L'AMDEC** y aura toujours sa place, mais si le début de l'étude sera la même, la fin en sera différente puisqu'il n'est plus besoin d'identifier la Fréquence qui est souvent un avis sans grande fiabilité, mais développer la Détection, les Modes de Défaillances, les phénomènes physiques à surveiller et identifier les capteurs strictement nécessaires

¹⁷ Voir le logiciel Best de la société Bayesia

¹⁸ Optimisation de la Maintenance par le Conditionnel

¹⁹ Méthode d'Identification des Capteurs pour la Maintenance et l'Analyse Proactive

- ✓ Les **Modes de Défaillances** étant identifiés à partir de la description des Fonctions, les Causes étant identifiées par les Fonctions de contraintes, il apparaît que l'**Analyse fonctionnelle** prend toute son importance, surtout interne !!

Afin d'identifier les phénomènes physiques à surveiller, il faut identifier, **Objet par Objet** tous les Modes de Défaillance possibles et ont a besoin d'information précises, sur :

- ✓ la connaissance des **Technologies**, des **Matériaux**
- ✓ la description de leurs **Fonctions Principales** et de leurs **Fonctions de Contraintes** (Internes et Externes)
- ✓ la connaissance précise des **Modes de Défaillance** des Sous-ensembles,

Les Méthodes actuelles, comme les **AMDEC Moyens** ne délivrent que des recommandations Correctives en conception ou Préventives pour le service Maintenance, mais rien pour identifier les Capteurs utiles...

Il faut donc faire évoluer ces Méthodes un peu dépassées dans ce cadre :

Par rapport à la conception d'un Plan de Maintenance traditionnel, basé sur l'Expérience, les Résultats des **AMDEC moyens** (Malheureusement souvent très mal réalisés, par manque d'Analyse Fonctionnelle préalable et de manque de culture de la Fiabilité par ceux qui y participent), la conception d'un **Plan de Maintenance 4.0** sera d'une autre nature.

Ci-dessous un exemple simplifié de recherche de capteurs basé sur les fondamentaux des **AMDEC Moyens** mais dont les résultats n'ont plus la même forme, la cotation de la Fréquence ne sert plus à rien, puisque la Détection est permanente....

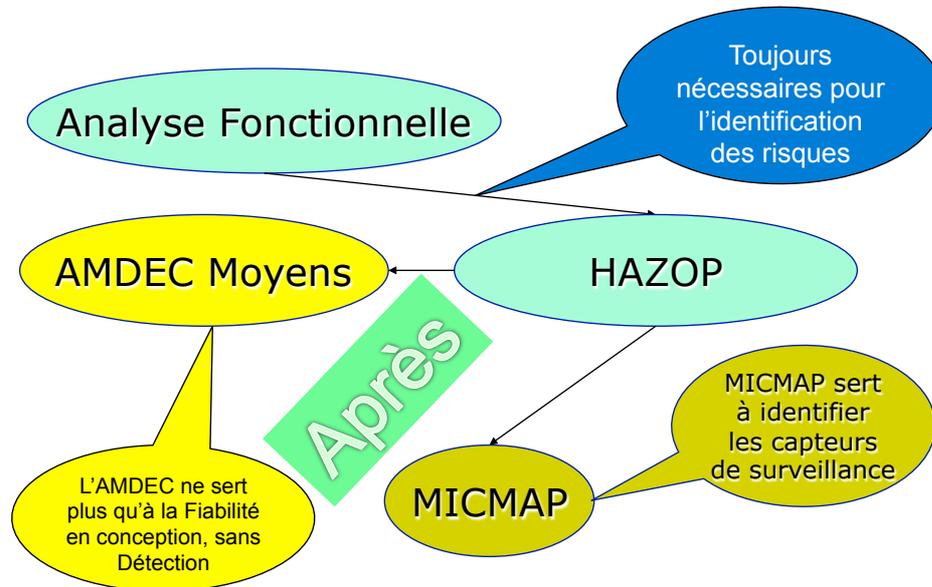
La méthode **MICMAP®** permet à partir d'une base de données de tous les systèmes d'entraînement possibles, d'identifier les capteurs utiles à mettre en œuvre pour la surveillance en continue des **Phénomènes Physiques** caractérisant les **Modes de Défaillances** des **Objets** à surveiller et leurs emplacements adaptés.

SOUS-ENSEMBLE	ORGANE	Mode de Défaillance Intrinsèque	Phénomène Physique à surveiller	Capteur	Actions IND. Programmation	
Groupe Moto Pompe	Moteur Triphasé	Vibration	Déséquilibre du rotor Dégradation des roulements/paliers	Vibration Vibration	Analyse de Vibration Analyse de Vibration	
		Echauffement	Défaut d'isolement Fonctionnement sur deux phases	Température Température	Thermographie IR Thermographie IR	
		Grognement	Fonctionnement deux phases		Sonomètre	
		Accouplement	Désalignement	Desserrage	Bruit	Sonomètre
	Usure			Bruit	Sonomètre	
	Pompe	Vibration	Vibration	Usure des aubes, rotor	Vibration	Analyse de Vibration
			Desserrage des fixations Vibrations tuyauteries d'entrée et de sortie			
		Cotation	Encrassement du filtre à l'aspiration	Niveau du réservoir trop bas	Indicateur de colmatage, Delta P	Préventif systématique
				Démarrage avec vanne d'aspiration fermée	Contôleur de niveau	Conditions de démarrage avec position des vannes
		Fuite de garniture		Ultra-sons	Pistolet Ultra-Sonore	

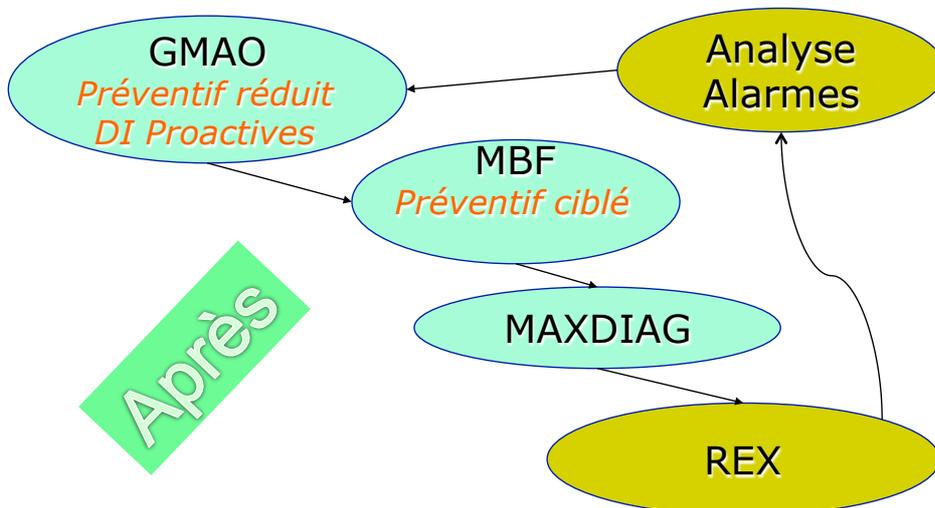
Seules les applications basées sur des bases de données relationnelles seront utiles, terminé les **AMDEC sur Excel**, toutes les données seront en base de données relationnelles et non identifiées lors de travail de groupe, où tout le monde dit tout et n'importe quoi.

Les Méthodes doivent évoluer, du stade de la **Conception** au stade de l'**Exploitation**.

Au stade de la **Conception**, cela concerne les Méthodes **Inductives** :



Au stade de l'**Exploitation**, cela concerne les Méthodes **Déductives** :



3.3 Troisième étape, identification des Capteurs et de leurs positionnement

Une fois les **Modes de Défaillances** identifiés, il restera à identifier les emplacements et les **capteurs** à installer ainsi que les paramètres de surveillance des signaux qu'ils délivrent.

S Consultants

Cela est de la compétence des Ingénieurs qui connaissent les Capteurs et ce qu'ils sont capables de surveiller comme phénomènes physiques dans les tolérances requises ou normalisées ??

Depuis peu, des capteurs de toutes natures sont apparus, miniaturisés grâce aux nanotechnologies, permettant de surveiller pratiquement tous les phénomènes physiques possibles et surtout communicants par des réseaux dédiés (Wi-Fi, filaires)

Ces capteurs délivrent des informations en temps réel, concentrées, analysées, corrélées et enregistrés dans le **BIG DATA** et interactifs en communications.

La modélisation des systèmes d'entraînement est indispensable pour identifier :

- ✓ Les **Objets**
- ✓ Les **Modes de Défaillance**
- ✓ L'emplacement des **points de surveillance**

Et donc en déduire les types de **Capteurs** à installer.

Elle existe dans le logiciel **DIAGDEF**²⁰ des bases de données utilisables sous la forme du couplage **Objets/Défauts**.

Une bibliothèque des outils de **CND**²¹ et **Capteurs** et les Défaillances qu'ils peuvent surveiller est donc utile pour compléter la base d'analyse.

Une fois les Capteurs installés dans une phase de surveillance, une analyse par **l'Entropie** permettra d'identifier si tous les capteurs identifiés sont nécessaires à conserver pour éviter la redondance inutile, où seulement certains d'entre eux.

En résumé, il est possible d'identifier les points de mesure pour surveiller les phénomènes physiques (Vitesses vibratoires en basses et hautes en mm/s, fréquences d'engrènement, vibrations, chocs de défauts de roulement en gs/e, déplacements, accélérations, échauffements, ..).

Un exemple d'intégration de capteurs proposé par **MONIXO** ;



²⁰ Logiciel de conception des Défailligrammes de la méthode **MAXER**

²¹ Contrôles Non Destructifs

3.4 Cinquième étape, élaboration du Plan de Maintenance Proactif et de la conception d'une base de données de retour d'expérience.

Il restera aux Responsables Maintenance de faire évoluer ce qui leur restera de leur Préventif, plutôt **Proactif** désormais.

4. L'approche Systémique de S CONSULTANTS, la Maintenance 5.0

L'approche **Systémique** consiste à boucler le processus en réalisant des corrélations entre les paramètres de sortie et les constituants qui les produisent.

Selon un adage bien connu, un processus *non bouclé ne sert à rien...*

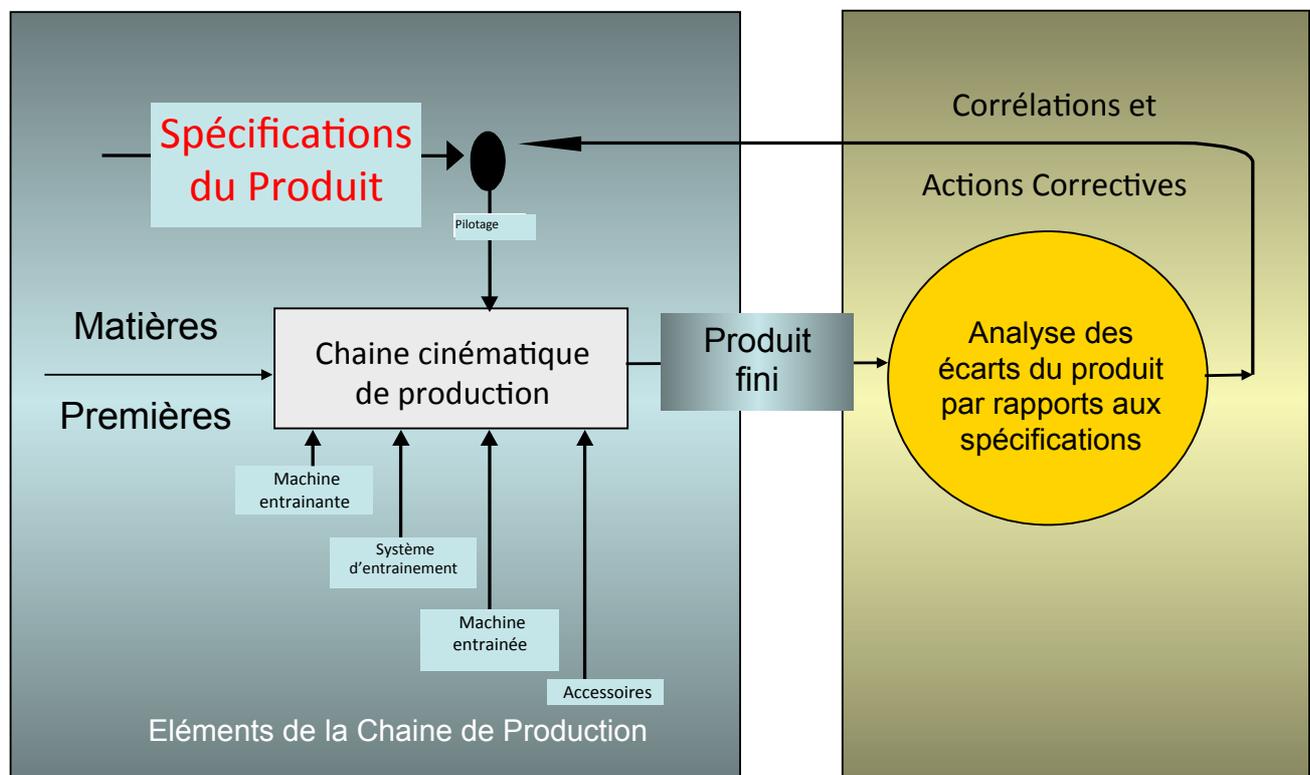
Mais dans la **Maintenance 5.0**, on risque de bousculer un certain nombre de principes et d'idées reçues...

Qu'est-ce qu'un **processus bouclé**, c'est l'application des principes d'asservissement de la Cybernétique.

La **Maintenance 5.0** consiste à prendre en compte la corrélation qui peut exister entre la non-qualité des produits finis et les dysfonctionnements de la chaîne cinématique de production.

Bien entendu la définition du « **Produit** » peut être matérielle physique, matérielle fluide (Électricité, Hydraulique, Pneumatique).

Maintenance 5.0

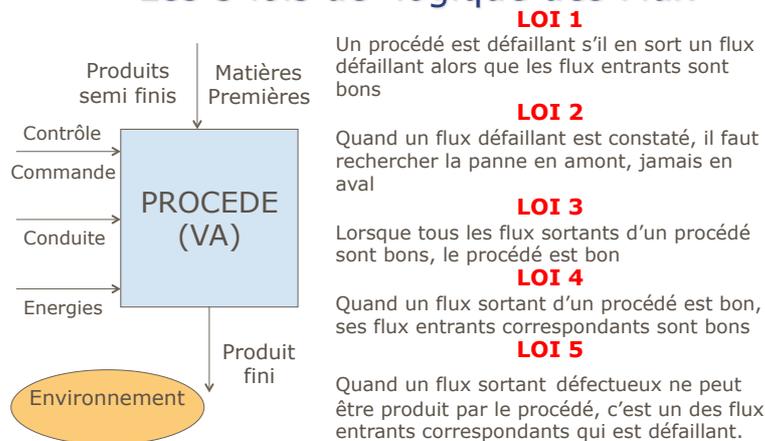


Remarque : La **Maintenance 4.0** se résume souvent à la mise en place de Capteurs et à leur utilisation par des solutions informatiques innovantes, mais ne prend pas en compte la vision **systemique**²²

Donc la **Maintenance 5.0**, est la vision systemique par la prise en compte des corrélations entre les informations recueillies de part et d'autre, c'est à dire l'analyse de la sortie pour identifier les causes provenant de l'entrée où du système de transformation (La Valeur Ajoutée)

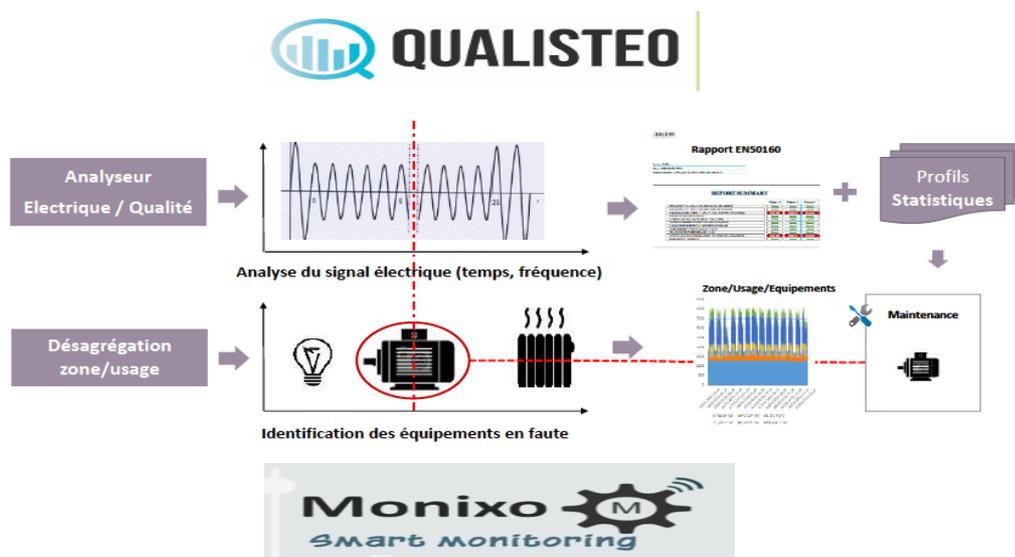
On pourra s'inspirer des « **5 lois de la logique des Flux** » de ©Jean Philippe de l'Espinay²³ qui permettent de trouver des causes de phénomènes anormaux en prenant en compte la variabilité des Entrées, des Sorties et de l'équipement qui amène la valeur ajoutée.

Les 5 lois de logique des Flux



J'ai personnellement identifié des acteurs innovants, comme **MONIXO** dans l'expertise de la surveillance des phénomènes physiques anormaux, et **QUALISTEO** dans le domaine de la maîtrise énergétique de l'électricité.

Les synergies sont évidentes voir très innovantes comme le montre le schéma ci-dessous :



²² Pour ceux qui n'ont pas encore lu l'ouvrage « Le microscope » de Joël de Rosnay, il est encore temps...

²³ TREE LOGIC LTD <http://www.tree-logic.com>

Mais il existe d'autres acteurs en provenance de la Maintenance qui offrent des solutions plus globales qui partent du Diagnostic de la Maintenance à la mise des l'information utile sur des tablettes, comme **Diamaint**.

5. Incidence sur les Méthodes et les Organisations

Est-ce que les Responsables de Maintenance ont modifié leurs Politiques, leurs Organisations, demandé des Formations sur la Fiabilité, et les Associations de Maintenance ont-elles fait leur travail de Veille Technologique ??

On voit déjà que les Normes Maintenance sont dépassées, car le Préventif classique Normalisé est déjà obsolète, dépassé dans sa structure actuelle et doit changer de forme et intégrer un vrai vocabulaire, car tout le monde mélange allègrement le **Prédictif** et le **Proactif**... termes souvent d'origines commerciales.

L'incidence de la **Maintenance 4.0** devrait être prise en compte par les éditeurs de **GMAO**, pour intégrer dans leurs équipes de développeurs des Experts Maintenance et des Fiabilistes. Mais le **G** de la **GMAO** reste toujours une connotation de Gestion des activités de la Maintenance, toujours utile et non la Gestion de la Fiabilité.

Par exemple, la **Maintenance Conditionnelle** déclenchée sur des Unités d'Usage (Volumes, quantités produites, compteurs), ne prend pas en compte les conditions d'utilisation et de la variabilité des paramètres de fonctionnement ainsi que celles des matières premières à transformer).

La surveillance continue des équipements s'en affranchie, tout en n'étant pas capable de savoir directement qu'elles sont les conditions d'environnement qui ont changées !!

L'analyse humaine sera toujours nécessaire à terme pour identifier les Causes Premières, à choisir dans les familles suivantes :

- Choix stratégiques d'Achats (Moyens, Résultats)
- Conception (BE/Ingénierie)
- Réalisation (Assemblage chez le Constructeur)
- Montage (Chez le Client)
- Exploitation (Production, Opérateurs, Procédures)
- Modifications ratées
- Maintenance (Politique, Stratégie, Compétences, erreurs..)



Presque toutes les causes premières sont d'origines humaines !!!!!

Ce qui n'est pas maitrisable : Les conditions d'environnement, T°, pollutions diverses et la mort subite des composants électroniques

6. Conclusions

Si l'**Intelligence Artificielle** est utilisée pour le traitement de l'information, il restera toujours l'**Intelligence Naturelle** basée sur le Raisonnement pour identifier les **Causes Premières**, car le **Big Data** ne sait pas concevoir des chaînes causales, comme le fait magistralement et informatiquement le **Défailligramme** de la méthode **MAXER, DIAGDEF**.

En résumé la **Maintenance 4.0** peut s'imaginer avec la comparaison suivante :

- ✓ Une montre mécanique donne l'Heure, sans plus
- ✓ Une montre connectée avec des capteurs multiples en contact avec le corps humain munie des capteurs inertiels, de localisation intégrés, permet de surveiller, d'orienter sur son état physique, mais ne donnera pas de diagnostic...

Mais il faut une interprétation humaine de l'état Physique, pour trouver les causes.

On pourrait comparer les flux des machines à l'être humain qui lui aussi a des flux d'énergie, par exemple en comparant, de manière simplifiée, l'Être Humain et les Machines :

Nature des Flux	L'être Humain	La Machine	Modes de Défaillance
Mécaniques	Articulations, ligaments	Rotules, accouplements, engrenages, courroies	Grippage, rupture
Hydrauliques	le Cœur, Réseau sanguin	Pompe, circuit Hydraulique	Arrêt, encrassement, bouchage, fuite
Aérauliques	Poumon, circulation de l'air pour la respiration	Pompe, circuit pneumatique	Arrêt, encrassement, bouchage, fuite
Stimulation du cerveau	Impulsions électriques	Flux électriques de puissance ou de commande	Perte d'Énergie, Court-circuit
Électricité/Énergies	Les Méridiens, les nerfs (filtres pour les machines, tsubos pour les méridiens)	L Électricité produite dans les réseaux	Énergie Non Conforme NF 50160

Mais cela devrait faire hurler les puristes de la Médecine Chinoise, les Acuponcteurs et Shiatsuki, les uns travaillant sur les points des **Méridiens**, les « tsubos » avec des aiguilles, les autres avec la pression des doigts ou des moxa (Crayon à température élevée).

On passe d'une information basique à une information consolidée avec de nombreux horizons d'exploitation, et cela avec l'aide la miniaturisation des capteurs pour la saisie de l'information fondamentale.

S Consultants

La **Maintenance 4 ou 5.0** nous entraine à **dépoussiérer** nos vieilles méthodes et en concevoir d'autres liés aux améliorations technologiques et revenir aux fondamentaux de la culture Fiabiliste Opérationnelle, et cela dans tous les domaines, de l'éducation Nationale, Professionnelle, continue avec une réactivité autant rapide que les évolutions technologiques.

Donc on devrait s'appliquer à soi-même les principes de la Cybernétique....

A suivre ...

Jean-Paul SOURIS
Ingénieur Cybernéticien
Expert Maintenance.
Instructeur Exclusif de la Méthode MAXER
Master Black Belt Lean 6 Sigma
S CONSULTANTS SAS
jps@sigmaxer.fr
www.sigmaxer.fr
tél : 01 34 87 03 73
gsm : 06 80 30 56 43

