

L'Organisation de la Maintenance

De Rome jusqu'à aujourd'hui



Gérard NEYRET
*Ingénieur Centrale
des Arts et Manufactures
Vice-Président de l'AFIM
Expert Technologia*

Résumé :

L'auteur décrit les évolutions de la maintenance, depuis le début jusqu'à nos jours.

Le point central de cet exposé est la première description écrite des principes fondamentaux de la Maintenance, à partir d'un cas concret de Management de la Maintenance : la remise en état d'abord, puis l'adoption de bons principes d'Opération et de Maintenance sur le réseau d'adduction d'eau de la ville de Rome, sur l'ordre de l'empereur Nerva, en l'an 97 après JC.

Le réseau était tout à fait dégradé à la suite de la mauvaise gestion du précédent empereur Domitien, qui mettait dans sa poche personnelle l'argent versé par les citoyens de Rome pour le service de l'eau.

Nerva confia cette tâche à un homme intelligent et énergique, Sextius Julius Frontinus, dit « Frontin », qui décrivit son expérience à travers un livre qui fit référence à travers l'Antiquité et le Moyen-Age, ouvrage très simplement intitulé : « De Aquae Ductu Urbis Romae » (Des Aqueducs de la ville de Rome).

Tous les principes de base de la maintenance moderne se retrouvent en germe dans cet ouvrage.

L'exposé se termine par une brève description des principales évolutions de la Maintenance, de Frontin à nos jours.

* * *

Première Partie : Avant Frontin

La Maintenance plus vieille que l'Homme

Il y a une parfaite analogie entre la Médecine, qui s'occupe des êtres vivants, et la Maintenance, qui est la médecine des équipements de toutes sortes fabriqués ou construits par l'homme.

Leur but commun est en effet de maintenir dans le meilleur état de santé possible les êtres vivants et les équipements, et de rétablir cet état de santé quand il est détérioré. De nos jours on peut remarquer cette analogie à travers certains équipements de même principe, utilisés soit en médecine, soit en maintenance, comme les rayons X ou les endoscopes. La langue russe utilise même le mot « maintenance prophylactique » pour désigner la maintenance préventive !

Et la nature avait inventé, bien avant l'arrivée de l'homme sur terre, pour maintenir la santé des êtres vivants, les deux bases fondamentales de la maintenance :

- la maintenance préventive, voire le « condition monitoring », par la mise en place des défenses immunitaires, comme les globules blancs du sang qui détectent la manifestation d'un microbe et le détruisent
- la maintenance corrective, qui conduit à la cicatrisation des blessures, et au mécanisme qui permet à un os cassé de se ressouder

La Maintenance avant Frontin

Il est bien certain que dès que l'homme a su fabriquer un objet, ou faire des constructions, il a eu soin de l'entretenir ou de le réparer.

Une chose est bien certaine, il a eu dès le début le souci de la maintenance à la conception, et appliquait déjà, sans le savoir, les principes RAMS (Reliability, Availability, Maintainability, Safety). C'est à de tels principes que nous devons la bonne conservation de nombreuses constructions de l'Antiquité.

Par exemple, quand on observe au musée du Caire en Egypte le char de Tout-Ankh-Amon, on constate que les jantes extérieures des roues sont revêtues d'une bande d'usure protectrice, tenant lieu de pneumatiques (tyres). De même le moyeu (hub) des roues autour de leur axe est très allongé, pour réduire la pression sur l'axe et augmenter sa durée de vie.

De même, on découvre dans la Bible la première loi sur la sécurité dans la construction, à savoir l'édification obligatoire d'un mur autour des toitures en terrasse. Relire le Deutéronome, chapitre 22, verset 8 : « Quand vous bâtirez une nouvelle maison, construisez un muret autour du toit en terrasse, afin de ne pas être responsable si quelqu'un se tue en tombant du toit ».

Les tâches de réparations et de reconstruction des murailles de Jérusalem sont aussi mentionnées dans la Bible : relire le livre de Néhémie, chapitre 3, verset 15 : « il répara aussi la muraille à côté de l'étang de Siloé... ».

Mais le premier écrit spécifique conservé sur la Maintenance traite d'un sujet brûlant, toujours d'actualité aujourd'hui : le prix excessif des pièces de rechange d'origine.

Il s'agit d'un papyrus égyptien de l'époque décadente Saïte (600 ans avant JC), écrit par un prêtre d'Amon envoyé au Liban pour acheter des poutres et planches en bois de cèdre nécessaires à la réparation de la barque sacrée du dieu Amon-Râ, au temple de Thèbes (Karnak). Cette barque, qui avait plus de mille ans, était en fort mauvais état. Le seul bois disponible en Egypte était du bois de palmier, fibreux et impropre à la construction navale : c'est pourquoi il fallait du bois de cèdre.

Dans cette lettre, le prêtre avoue l'échec de sa mission : il n'avait pas assez d'argent, car les Libanais, forts de leur monopole, vendaient leur bois de rechange à un prix exagéré : le prêtre va même jusqu'à parler d'escroquerie...

* * *

Deuxième partie : Frontin

Ce Romain fut le premier à décrire un management d'Opération et de Maintenance à partir d'un cas concret : la remise en état, en 97 après JC, du réseau d'eau de Rome, dont il fut le responsable.

L'homme Frontin

Sextius Julius Frontinus, dit le Frontin, qui appartenait, comme Jules César, à la « gens » Julia, fut un grand serviteur de l'Etat. Né aux environs de 35 après JC, il fut préteur urbain en 70, puis se démit de sa préture et entra dans l'armée. Il combattit les révoltes Gauloises, puis Germanes et finalement celles du pays de Galles en Grande-Bretagne, où il construisit une route, la Via Julia, qui subsiste encore dans le Comté de Monmouth. Il occupa ensuite le poste élevé de proconsul d'Asie. Sous la tyrannie de Domitien, il se retira dans ses villas, lisant et écrivant.

Il fut rappelé par le successeur de Domitien, l'empereur Nerva en 97, pour la fonction de « curateur des eaux », qui lui donnait le statut de magistrat, avec pouvoir de donner des amendes à tous ceux qui détournaient ou salissaient l'eau. Sa mission était de remettre en bon état de fonctionnement le réseau d'adduction et de distribution d'eau de Rome, dont le mauvais état causé par la mauvaise gestion antérieure entraînait des pénuries d'eau et un mécontentement général dans la population romaine. C'est là qu'il mit au point ses méthodes et écrivit son livre.

Il fut ensuite nommé après trois fois consul sous Trajan, qui succéda à Nerva, et siégea au Sénat à la droite de l'empereur. Il reçut ensuite la charge très honorifique d'augure, qu'il fit transmettre à sa mort en 104 à Pline le Jeune.

Pline d'ailleurs fait part de sa grande estime pour Frontin dans ses Lettres (V,1 – Lettre à Annius Severius). Il vante aussi sa modestie, mais aussi sa fierté, rappelant les mots de Frontin, interdisant qu'on lui édifie un monument après sa mort : « Impensa monumenti supervacua est : memoria nostra durabit si vita meruimus » (« La dépense d'un monument est superflue : notre souvenir durera, si nous l'avons mérité par notre vie » - Cf Pline, Lettre IX, 19 à Ruso). L'Histoire lui a donné raison...

En résumé, Frontin est l'exemple du grand Romain, efficace et cultivé, et imprégné du sens du service public.

Le réseau d'eau de Rome du temps de Frontin

Ce réseau est connu à cause des ruines qui existent encore. Mais il est surtout connu, par les descriptions détaillées et l'historique qu'en fait Frontin dans son livre (*NB - quand nécessaire, dans ce qui suit la référence des paragraphes concernés dans le livre sera définie par leur numérotation en chiffres romains*).

Jusqu'en 441 après la fondation de Rome (312 avant JC), les Romains puisaient leur eau dans le Tibre, les puits et les sources (§IV). Ces ressources devenant insuffisantes à cause de l'extension de la ville, le premier aqueduc, l'Aqua Appia, fut fondé ainsi que le célèbre Via Appia par Appius. Frontin révèle d'ailleurs que cette appellation fut usurpée par Appius, le véritable fondateur étant son collègue Plautius Venox, qui découvrit les nappes alimentant l'ouvrage (§V).

Cet aqueduc n'était pas le premier ouvrage hydraulique de Rome. Ce fut, bien auparavant, le grand égoût (Cloaca Maxima), exécuté vers 600 avant JC par le roi Tarquin l'Ancien, avec la construction voûtée mise au point par les Etrusques.

Au fur et à mesure de l'extension de Rome, il fallut construire d'autres aqueducs, en allant chercher l'eau de plus en plus loin : les aqueducs Anio Vetus (272 avant JC), Marcia (144 av. JC), Tepula (125 av. JC), Julia (par Jules César, en 53 av.JC), Virgo (ainsi nommé car une petite fille indiqua sa nappe d'alimentation – 19 av.JC), Alsietina (2 après JC, alimenté en eau impropre à la consommation, et destinée aux jardins), et enfin les deux aqueducs réalisés par Claude : Claudia (47 ap. JC) et Anio Novius (52 ap. JC). Les règles d'exploitation avaient été redéfinies déjà par Agrippa, en 33 avant JC.

C'est la situation que trouva Frontin. La pénurie d'eau, liée au gaspillage, faisait envisager la construction d'un dixième aqueduc. La bonne gestion et la bonne maintenance mise en place par Frontin rendit inutile ce projet. Ce fut un premier et bel exemple de l'économie considérable apportée par cette « Productive Maintenance ».

La capacité globale de ces ouvrages était considérable, même selon les critères modernes : un million de mètres cubes par jour. Quatre aqueducs devaient chercher l'eau assez loin (Anio Vetus, Marcia), les plus récents (Claudia, Anio Novius) étaient encore plus éloignés, ce qui faisait une distance de 60 à 80 kilomètres de Rome, dans la haute vallée de l'Anio, vers Subiaco. Comme il n'existait pas de moyen de pompage, le besoin était d'avoir la plus grande hauteur possible de départ et une pente régulière. Le souci permanent était de réduire au maximum la perte de charge, et donc d'avoir le plus court chemin possible, ce qui explique les ponts-canaux de grande hauteur pour la traversée des vallées. Selon la configuration du sol, le tracé d'un aqueduc se composait donc de ces ponts construits en pierre, ou en tuf moins solide, en canaux creusés dans le sol, ou en tunnels, que Frontin appréciait particulièrement car ils ne donnaient aucun problème de maintenance. Un de ces tunnels (aqueduc Virgo) sert toujours aujourd'hui, deux mille ans après, à alimenter la fontaine Trévise à Rome, ce qui est un très bel exemple de « Life Cycle Profit » !

Mais il ne suffisait pas d'apporter l'eau : il fallait encore la distribuer dans la ville, et d'abord rendre cohérent le réseau interne, qui avait été construit à travers les siècles, sans plan d'ensemble, au fur et à mesure des besoins. Le principe de base était que chaque aqueduc

alimentait un réservoir d'eau principal (« château d'eau »), d'où partaient en étoile plusieurs conduits vers des châteaux d'eau secondaires, qui eux-mêmes alimentaient des châteaux d'eau tertiaires, qui alimentaient les fontaines publiques. Le grand principe en effet, pour économiser l'eau, était de ne pas avoir l'eau courante à domicile, mais d'obliger les utilisateurs à chercher l'eau à la fontaine, sauf pour ceux ayant obtenu une concession spéciale de l'Empereur, par exemple pour les thermes. La répartition de l'eau se faisait par des orifices calibrés de différents diamètres (de 5/4 à 20 pouces romains), d'abord simples éléments de tuyauterie en plomb. Mais quand Frontin découvrit que les utilisateurs augmentaient frauduleusement leur part de débit, par effet Venturi, en évasant sous forme conique l'aval du tuyau de plomb, il remplaça le plomb par un bronze très dur. Ces orifices étaient poinçonnés pour certifier leur conformité.

Les tuyauteries étaient faites d'une feuille de plomb enroulée, avec une soudure longitudinale. Leurs diamètres étaient normalisés, et le nom du propriétaire inscrit sur chaque élément, ce qui permet encore aujourd'hui aux archéologues d'identifier ceux-ci.

La distribution formait un ensemble complexe, incluant des réservoirs, des bassins de décantation pour les eaux chargées, en particulier quand elles avaient été rendues boueuses après les pluies, des fontaines, etc. La totalisation des chiffres donnés par Frontin est éloquent : 247 châteaux d'eau, 39 fontaines monumentales, 591 bassins publics pour puiser l'eau et 22 camps desservis.

Chaque château d'eau était équipé d'un trop-plein (overflow), qui envoyait l'eau en excès dans les égoûts pour rincer ceux-ci. Une grande fierté de Frontin, après avoir rétabli l'abondance d'eau par la suppression des fuites et des prélèvements clandestins, était d'avoir rétabli une alimentation d'eau suffisante dans les caniveaux et les égoûts, ce qui avait chassé les mauvaises odeurs de la ville (§ LXXXVIII).

Frontin découvrit en effet avec surprise, que d'après les chiffres officiels, il sortait plus d'eau des aqueducs qu'il n'en rentrait ! Il fit donc mesurer avec précision, en été, les débits d'alimentation. Il obtint ainsi un total d'un million de mètres cubes par jour, dont seulement 570000 arrivaient en ville, le reste se perdant dans les débordements, les fuites, et les vols innombrables.

Bien entendu, il fallait lutter contre les abus et les prélèvements clandestins. C'est pourquoi il fit établir une réglementation sévère et détaillée, assortie de fortes amendes (de 10000 à 100000 sesterces) pour punir fraude et abus.

Les dépenses étaient couvertes par les redevances afférentes aux droits d'utilisation des eaux. Frontin découvrit très vite que Domitien prenait cet argent pour son usage personnel, en laissant les exploitants sans ressources, ce qui entraîna toutes sortes de désordres : trafics illicites, qu'alimentations d'eau clandestines, vol d'eau par des « piqûres » (puncta) dans les tuyaux. Il agit auprès de Nerva pour rendre cet argent à l'exploitation et la maintenance (§CXVIII).

Le livre de Frontin n'est pas le premier exemple de livre technique du monde Romain. Plus de cent ans avant Frontin, l'architecte Vitruve avait publié un livre sur les techniques de construction, qui fit autorité jusqu'à la Renaissance italienne au XVIème siècle. Dans ce livre figure une première estimation très approximative du débit d'un tuyau d'eau.

Le livre de Frontin est bien composé... et très franc. Il n'hésite pas à bien faire connaître son point de vue, souligner les abus, les erreurs, ou les mauvaises décisions prises : par contre il est fier de la taille de ses grands aqueducs, tels que l'Anio Novius : « Ce sont des arches très hautes et qui s'élèvent, en certains endroits jusqu'à 109 pieds. Aux masses si nombreuses et si nécessaires de tant d'aqueducs, allez donc comparer les Pyramides, qui ne servent à rien, ou encore les ouvrages des Grecs, inutiles, mais célébrés partout ! » (§XVI).

Notons au passage un point de vocabulaire. Pour Frontin, le mot « maintenance » se dit en latin « tutela », qui a donné le mot français « tutelle » et le mot anglais « tutelage », qui définissent le soin à apporter à un enfant. Or le mot « maintenance » vient du vieux verbe français « maintenir », qui signifie « tenir la main », comme un père de famille tient la main de son petit garçon. On voit bien la similitude des deux appellations.

(NB – Les quelques citations en français du texte de Frontin proviennent de la traduction en français de M. Pierre Grimal, dans l'édition bilingue du livre publié par la société d'édition « Les Belles Lettres », 95 bd Raspail, 75006 Paris – Pierre Grimal avait en 1982 autorisé G. Neyret à faire des citations de son texte)

Il serait intéressant, mais trop long de décrire le contenu de cet ouvrage. Nous n'en feront ressortir que les points essentiels, en particulier ceux concernant la maintenance.

Première partie : présentation générale

Dans une première partie de son livre (§ I à II), Frontin explique d'abord les principes de son action, sa motivation et sa stratégie :

« A partir du moment où l'Empereur m'a chargé de l'administration des eaux, qui intéresse autant que l'utilité, l'hygiène et même la sécurité de la ville, **j'estime que mon premier et mon principal devoir est, comme cela a été ma règle dans mes autres activités, de bien connaître ce que j'ai entrepris** (« primum ac potissimum existimo...nosse quod suscepi »-§I).

Pour Frontin, il n'y a pas meilleur outil que cette connaissance du métier pour l'aider à prendre la bonne décision au bon moment. Au contraire, si le chef est incompetent, ce sont les subordonnés qui commandent, et Frontin n'avait pas été mis à ce poste pour cela (§II).

Frontin explique ensuite pourquoi il a rédigé ce livre de façon très détaillée, en pensant surtout au maintien de sa propre compétence, pour lui servir d'aide-mémoire (data base) et de documentation technique, avec éventuellement une utilisation par son successeur (§II). Il reconnaît plus loin (§LXXVII) que l'obligation de détailler les chiffres peut en rendre fastidieuse la lecture (« ceux qui se contenteront de connaître l'ensemble pourront passer rapidement sur le détail - iis quibus sufficet cognovisse summa, licebit transire leviora »).

En fait, ce livre servit de base pendant toute l'Antiquité et tout le Moyen-Age à tous les exploitants de distribution d'eau ! A tel point que l'on dispose actuellement de pas moins de

sept manuscrits de cet ouvrage, dont la base est le « Codex Cassinensis », réécrit au XIII^{ème} siècle par Pierre le Diacre à l'abbaye de Monte Cassino en Italie, où il est conservé, et qui fait autorité. Une version légèrement différente est donnée par le manuscrit « Vaticanus », qui fut imprimé à Rome vers 1490, puis à Florence en 1496 et 1513.

Frontin décrit ensuite brièvement au lecteur le plan de son livre (§III) :

- d'abord une description détaillée des équipements, de leur historique, de leurs caractéristiques fonctionnelles
- ensuite les règles d'exploitation et de maintenance
- enfin la réglementation officielle, avec les sanctions encourues par les contrevenants

Deuxième partie : l'exploitation

Dans cette partie, très longue (du §IV au §XCIII), Frontin fait la description détaillée des équipements :

- d'abord une brève liste des aqueducs, par leur noms (§IV)
- puis, du §V au §XXII, par ordre chronologique, la description physique des aqueducs : leur historique, leur source, leur usage, leur tracé et leur longueur. Au passage, il révèle le souci financier de la maintenance, dans le §XVII (« Car une partie essentielle de la charge que j'exerce étant leur maintenance, il faut que le titulaire sache quels sont les ouvrages qui demandent le plus de frais ») . Il révèle d'ailleurs, dans le même §XVII, que pour mieux connaître ses installations, il a inspecté toutes ses installations... ce qui représente, à cheval ou à pied, près de 800 kilomètres parcourus ! Et, comme il ne pouvait pas répéter incessamment ces visites, il a inventé la documentation technique, en faisant réaliser les plans de tous les aqueducs, pour mieux suivre leur maintenance : « Et mon zèle ne s'est pas contenté d'inspecter chaque aqueduc un à un : j'ai fait dresser en outre des plans des aqueducs, montrant les endroits où ils traversent des vallées et les dimensions de celles-ci, où ils traversent des rivières, où les canaux, établis à flanc de montagne, demandent un soin plus attentif pour la visite et la réparation de ces conduits. Il en résulte cet avantage que je puis avoir en quelque sorte la situation d'un seul coup sous les yeux et prendre des décisions comme si j'étais sur place ». En lisant ces mots, on voit brièvement l'action d'un véritable « Maintenance Manager » : il suit les points les plus vulnérables, et il fait procéder à des visites, qui entraînent en cas de besoin les réparations nécessaires
- ensuite, du §XXIII au §LXXXVI, Frontin parle des caractéristiques d'exploitation, à savoir les débits d'eau de chaque aqueduc, la revue des diamètres et débits des tuyaux et calibres de mesure standardisés (du §XXXIX au §LXIII), et de l'exploitation de chaque aqueduc (du §LXIV au § LXXIII). Il constate les erreurs des mesures des registres, qui indiquent officiellement à l'aval un débit de sortie supérieur à celui qui rentre officiellement ! Ce qui le conduit à refaire les mesures de débit, en Juillet, au début de la saison sèche, pour ne pas pécher par excès. Il trouve une capacité globale de 1 million de mètres-cubes par jour pour l'ensemble des aqueducs, et identifie grâce à cela un écart de 400000 m³ (10000 « quinarie ») avec le débit « officiel » (§LXXIV à LXXVII). Une partie de cet écart est dûe aux erreurs de mesure, l'autre à une quantité innombrable de prélèvements clandestins et de fuites le long des aqueducs dont il identifie personnellement 250000 m³,

surtout par les détournements d'eau sur les aqueducs les plus anciens (Anio Vetus et Marcia) auxquels il faut ajouter les débordements de trop-pleins (overflows), par exemple 64000 m³ sur le Claudia, à cause de la capacité insuffisante des canaux à l'aval (downstream ducts)

- Ceci le conduit à faire l'inventaire de la destination officielle des eaux et de la répartition des débits, globalement d'abord (560000 m³, dont 400000 m³ intra muros), puis aqueduc par aqueduc (§LXXVIII à §LXXXVI) avec les numéros des divers districts de Rome concernés. La suppression des prélèvements illicites et des fuites permit de disposer de beaucoup plus d'eau. Constatant qu'à chaque réparation d'un conduit, les usagers situés en aval (downstream) étaient privés d'eau, il équipa la plupart des fontaines publiques de deux arrivées en provenance de deux aqueducs différents, ce qui permettait l'alimentation même en cas de coupure d'eau pour travaux sur l'un des deux (§LXXXVII). L'alimentation d'eau fut plus régulière, et les égouts mieux alimentés, ce qui fit disparaître les mauvaises odeurs (§LXXXVIII)
- Frontin se préoccupe aussi de la qualité des eaux, en particulier lorsqu'elles deviennent boueuses à la suite de pluies (§LXXXIX à XCIII). Comme certains aqueducs étaient souvent pollués par la boue, et d'autres au contraire avaient une eau très pure, il fit modifier leur utilisation, de façon que les aqueducs à eau pure alimentent les eaux d'alimentation, et les moins pures les jardins et usages de nettoyage

Troisième partie : la maintenance

Dans cette partie du livre (§XCIV à CXXIV), Frontin parle enfin des différentes dispositions prises pour la bonne maintenance et la surveillance du réseau d'eau, et de la législation prises pour protéger le réseau contre les abus et les déprédations :

- les lois prises pour restreindre et surveiller les alimentations particulières, la priorité étant toujours donnée à la distribution publique
- la concession donnée à des contractants pour la maintenance de chaque aqueduc, avec des contrats précisant le nombre d'ouvriers à employer, le contrôle des travaux étant assuré par de haut fonctionnaires municipaux (censeurs, édiles). On retrouve ici la formule moderne d'« outsourcing » de la maintenance (§XCVI)
- la loi sanctionnait sévèrement l'utilisation non autorisée et tous ceux qui polluaient l'eau (§XCVII)
- Frontin fait ensuite l'historique (§XCVIII à CIV) des dispositions prises pour la gestion du système d'eau, y inclus la définition par Agrippa (33 avant JC) des pouvoirs du curateur des eaux. Agrippa dota en outre le réseau d'un personnel spécialisé pour le travail de maintenance. Frontin indique sa technique de surveillance : les inspections à l'improviste non prévues (§CIII). Les règles d'utilisation et de surveillance de l'usage de l'eau sont ensuite définies (§CV à CXI). Le curateur, chargé de contrôler les concessions d'usage de l'eau doit poinçonner les calibres qui en limitent le débit, pour en certifier la conformité. Personne ne doit utiliser l'eau des trop-pleins (overflows) des châteaux d'eau, pour que les égouts puissent disposer de suffisamment d'eau de rinçage (§CXI)
- Frontin décrit ensuite les principales fraudes constatées. Il constate par que de nombreux calibres sont surdimensionnés par rapport au débit de concession accordé, et même non poinçonnés, ce qui lui fait soupçonner des arrangements illégaux, et le conduit à faire poinçonner même les tuyaux qui en sortent (§CXII).

Il définit aussi la position du calibre par rapport au niveau du château d'eau, pour définir la pression d'entrée (§CXIII). Il repère de nombreuses prises d'eau illégales par des ouvertures dans les murs des châteaux d'eau (§CXIV), ou par des tuyauteries clandestines branchées sur les tuyauteries publiques, appelées « piquères » (puncta – §CXV)

- Frontin décrit ensuite (§CXVI à CXVIII) l'organisation du personnel de maintenance sous ses ordres directs, agents de maîtrise, inspecteurs et ouvriers spécialisés, constitués en deux groupes : le groupe de 240 hommes instauré par Agrippa et payés par l'Etat, et un groupe de 460 hommes payés par l'Empereur, instauré par Claude à la suite de la création de ses deux derniers aqueducs. Ce personnel était réparti géographiquement dans toutes les installations pour effectuer la surveillance (maintenance préventive), et signaler immédiatement toutes les anomalies et les travaux d'urgence (maintenance corrective). Frontin découvrit vite que beaucoup travaillaient illégalement pour des besoins privés. Il réagit en instaurant un contrôle du travail, en faisant chaque jour une réunion définissant les travaux à effectuer, et notant sur un journal ceux qui avaient été effectués dans la journée écoulée (§CXVII). Le personnel relevant de l'Etat était payé par les redevances d'usage, assez aléatoires : les derniers temps, Domitien, qui avait besoin d'argent confisquait cette somme pour son usage personnel. Nerva la rendit à sa destination, et Frontin définit des règles précises pour définir les lieux soumis à ces redevances. Les fournitures et matériels nécessaires à la maintenance étaient payés par l'Empereur (§CXVIII)
- Frontin définit ensuite les principes du management de la maintenance (§CXIX à CXXIV). Le principal consiste à entreprendre dès que possible les travaux de réfection nécessaires, avant que la situation ne se détériore, tout en se méfiant des suggestions des entrepreneurs (contractors), qui veulent toujours en faire plus. Il faut donc écouter autant ses propres ingénieurs que de bons experts extérieurs, pour discerner ce qui est urgent et ce qui peut attendre, ce qui doit être exécuté par le propre personnel du réseau et ce qui doit être confié à une entreprise extérieure (§CXIX)
- Les dégâts sont causés ou bien par le climat et les intempéries, ou bien par les détériorations causées par les riverains, ou encore par les malfaçons d'exécution, surtout sur les ouvrages récents (§CXX). Les points les plus vulnérables sont les parties à flanc de montagne, et les parties sur les arches, surtout au niveau des traversées de rivières. Par contre, les parties souterraines, protégées des gelées et des grosses chaleurs sont moins menacées
- En ce qui concerne les réparations, on distingue celles qui peuvent se faire sans arrêter le courant d'eau, et celles qui obligent à faire une coupure (§CXXI). Les causes principales d'avaries sont les dépôts de tartre (scaling), qui réduisent les sections de passage, ou les dégradations du revêtement d'étanchéité, qui sont causes de fuites. Les piliers des arches, construits non en pierres résistantes, mais en tuf, subissent des tassements sous la charge
- Les grandes réparations sont à préparer soigneusement à l'avance, pour réduire autant que possible le temps de coupure ; il faut les faire au printemps ou en automne, pour éviter de couper l'eau pendant les chaleurs de l'été. De même, on ne procède qu'à l'aqueduc après l'aqueduc, pour éviter le manque d'eau trop important que produiraient deux coupures simultanées (§CXXII). Les travaux qui n'exigent pas de coupure sont ceux relatifs aux réparations de maçonnerie : mais pour que le ciment prenne bien, il faut éviter aussi bien les périodes de gel que celles de trop

forte chaleur. On les fera donc du 1^{er} avril au 1^{er} novembre, sauf quand le soleil est trop ardent. Frontin insiste sur la nécessité d'une surveillance attentive des travaux, n'ayant que peu d'illusions sur la conscience professionnelle des exécutants: « Aussi un travail honnête doit-il être exigé dans chaque détail, conformément aux règles que tous connaissent, mais que bien peu appliquent »(§CXXIII). Le plus gros problème est posé par les plus grands ouvrages, à l'entrée de la ville, car chacun supporte plusieurs adductions. En cas de coupure, une grande partie de la ville serait privée d'eau. La méthode consiste alors à avancer autant que possible le travail, et poser un by-pass avec des gros tuyaux de plomb autour de la partie où la coupure est nécessaire (§CXXIV)

Quatrième partie : l'établissement de lois protectrices de la maintenance

Cette partie décrit les lois instaurées pour protéger la maintenance de son plus gros problème: les déprédations causés par les riverains des aqueducs (§CXXV à CXXX). Le plus gros souci est celui des relations difficiles avec ces riverains, qui s'opposent à leur accès par le personnel de surveillance et de maintenance, les empêchent de s'approvisionner en bois, pierres ou argile, s'adjugent la disposition des terrains réservés, et n'hésitent pas à perforer les conduits pour obtenir de l'eau. De plus, les racines des arbres plantés trop près des aqueducs font éclater les voûtes et les murs latéraux.

Frontin obtient du Sénat la publication de plusieurs décrets (senatus-consultes - §CXXV à CXXIX):

- Un décret obligeant les riverains à laisser libre accès au personnel d'exploitation et de maintenance et à leurs véhicules
- Un décret exigeant que dans un bande de 5 mètres autour des ouvrages il n'y ait ni arbre, ni construction, ni tombeau, ni culture : toute infraction se traduisant par une amende de 10000 sesterces, dont la moitié versée au dénonciateur, et l'autre moitié versée au Trésor public
- Une loi qui frappe d'une amende énorme (100000 sesterces) quiconque perce un aqueduc pour détourner l'eau, et l'oblige à payer les travaux de réparation
- Une exception est faite pour le pacage, le fauchage de l'herbe et l'enlèvement des ronces : avec autorisation spéciale, la vigne peut être tolérée. Mais il est exigé des riverains le nettoyage complet des bandes latérales, avec interdiction de n'y rien jeter. De même, les droits d'eau régulièrement acquis sont respectés, à condition de ne faire aucun nouveau prélèvement

Bien entendu, cette reprise en mains bouscule beaucoup de vieilles habitudes, Frontin s'emploie donc à appliquer ces lois avec diplomatie, mais sans faiblesse (§CXXX).

Ainsi se termine le livre de Frontin

Commentaire général

Non seulement Frontin fut un grand manager, aussi bien pour l'exploitation que pour la maintenance, chez qui la motivation, la pensée, et l'action étaient réunies, et qui avait un sens aigu de son devoir et de l'intérêt public, mais il a fait quelque chose de rare chez les managers : prendre le temps nécessaire pour mettre par écrit son expérience, pour sa propre

formation et celle des autres. A l'époque où écrire nécessitait de graver des tablettes de cire avec un stylet, sans ordinateur (computer) pour faire du « copier-coller », cela prenait beaucoup de temps !

A lire son ouvrage, l'ingénieur de maintenance d'aujourd'hui éprouve un choc. Presque deux mille ans avant nous, Frontin avait découvert et appliqué les principes de la maintenance moderne : la priorité donnée aux visites préventives ; l'équilibre budgétaire ; la mise en place des plans et de la documentation technique ; la programmation et le suivi quotidien du travail, où l'on décide ce qui est urgent ou pas, les travaux qu'on fait avec ses propres équipes et ceux confiés aux sous-traitants (contractors) ; l'action immédiate sur les petits désordres avant qu'ils ne s'aggravent ; la planification raisonnée des grandes interventions ; le souci de perturber le moins possible les utilisateurs pendant les travaux et assurer la redondance de l'alimentation; la standardisation des calibres et des tuyauteries ; les autorisations d'accès. etc. Ajoutons à cela la prémonition de la loi de Pareto (loi des 80/20) : il recherche et donne priorité aux ouvrages qui occasionnent le plus de dépenses (§XVII). On le voit s'indigner contre la mauvaise qualité du travail récent ; et, parallèlement à sa lutte constante contre le vol de l'eau, l'emploi de ses ouvriers à des fins privées. On remarque aussi son souci de l'environnement, pour éviter l'envoi d'une eau malsaine ou boueuse, et prévoir une quantité suffisante pour le rinçage des égoûts.

Quel est le responsable de maintenance aujourd'hui qui n'a pas les mêmes préoccupations ?

* * *

Troisième partie : Après Frontin, jusqu'à nos jours

Du Moyen-Age jusqu'à la Deuxième Guerre mondiale

L'histoire de la maintenance reste à écrire. Malheureusement, il semble qu'il faille attendre le XX^{ème} siècle pour voir enfin les ingénieurs de maintenance écrire un livre sur leur métier. La maintenance ayant été considérée comme une fonction de second rang, simple servante de l'Exploitation, on trouve peu de trace d'elle dans la littérature.

Cette fonction a certainement existé au Moyen-Age pour les cathédrales gothiques, longues à construire et plus vulnérables que les solides édifices romans, avec des inspections régulières et du personnel de maintenance : charpentiers, couvreurs, tailleurs de pierre. Sur les navires, c'était le travail du charpentier de bord. Par exemple les Vénitiens, qui avaient observé que leurs vaisseaux avaient beaucoup plus de chances de rentrer au port quand ils disposaient d'un charpentier pour effectuer les réparations à bord pendant les traversées, exigèrent dans les contrats d'affrètement passés avec les Croisés que ceux-ci fournissent un charpentier pour chaque navire mis à leur disposition.

Nous en avons seulement trouvé un exemple dans un acte notarié de 1603, sur la répartition hebdomadaire entre plusieurs familles de l'usage d'une scie actionnée par une roue à aubes hydraulique (paddle wheel). A la fin de chaque période d'attribution à une famille, celle-ci était obligée de remettre parfaitement l'installation en état, en y consacrant une demi-journée. Ceci prouve que la notion de maintenance systématique existait bien.

On peut penser que la maintenance industrielle apparut avec les premières manufactures. L'ingénieur militaire Vauban pensait à la durabilité de ses ouvrages, quand il écrivit le 17 juillet 1685 sa célèbre lettre à Louvois, Ministre de la Guerre sous Louis XIV, sur les aberrations auxquelles conduisaient l'excès de concurrence, et l'attribution systématique des contrats au contractant le moins cher, lettre semble toujours d'actualité aujourd'hui...

La fin du XVIII -ème siècle et le début du XIX -ème virent l'apparition de la machine à vapeur et de nouvelles technologies ; les guerres de la Révolution et de Napoléon un fantastique développement de l'industrie militaire. Ce sont les savants de la Convention française qui inventèrent en 1792 le contrôle des tolérances et les calibres de mesure (gauges), pour assurer l'interchangeabilité des composants de fusils, fabriqués par des centaines d'artisans différents.

Les savants de l'expédition de Bonaparte, immobilisés en Egypte après la destruction de la flotte française par l'amiral Nelson, inventèrent les méthodes de l'enseignement technique pour former rapidement des techniciens égyptiens, méthodes qu'ils appliquèrent en France pour fonder les écoles des Arts et Métiers, qui furent et sont encore la « colonne vertébrale » des usines françaises, notamment en Maintenance. La constatation de la dureté extrême des épées utilisées par les Syriens de Damas leur permit, après analyse du métal, de découvrir les aciers spéciaux. La bonne maintenance du matériel fut un souci constant des armées napoléoniennes ; chaque soldat avait la responsabilité de celle de son fusil (nettoyage). La création par Jacquard vers 1820 du métier à ruban automatique, premier automate programmable avec cartons perforés, véritable merveille de sophistication permettant le tissage de dessins variés, nécessita la création du premier métier de maintenance spécialisé (en Français : le « gareur »).

Le développement de la maintenance mécanique fut impulsé par les chemins de fer, qui créèrent les écoles d'apprentis spécialisés pour la maintenance des locomotives à vapeur, et développèrent la fonction de « visiteur » pour l'inspection préventive des wagons. Le navire à vapeur, le chemin de fer, la sidérurgie, les mines firent développer la fonction de mécanicien en maintenance. Le développement de l'industrie chimique obligea d'innover en anti-corrosion. Les progrès de la mécanique obligèrent d'inventer les lubrifiants pétroliers, le métal anti-friction (white metal), l'usinage au centième de millimètre. Les premiers roulements à billes équipèrent les premières automobiles. Pour faire face aux multiples explosions de chaudières, les propriétaires d'appareils à vapeur créèrent au milieu du XIX ème siècle des associations pour mettre au point les règles de calcul, d'exploitation et de maintenance des chaudières (par exemple l'APAVE française). Il en fut de même pour la construction des navires (par exemple par la création de Veritas).

L'apparition de l'électricité, avec une problématique nouvelle et des dangers nouveaux, entraîna la création du métier d'électricien. La première guerre mondiale nécessita une amélioration des méthodes industrielles, par exemple avec les nouvelles exigences de fiabilité requises pour l'aviation. Deux innovations technologiques majeures entre la première et la deuxième guerre mondiale révolutionnèrent la maintenance : la soudure de l'acier et l'acier inoxydable 18/8.

Face à toutes ces évolutions, la Maintenance commença à s'organiser, et la France fut pionnière, par la création en 1933 de l'Association des Chefs d'Entretien (ACE), qui devint l'AFICE, puis l'AFIM « Association Française des Ingénieurs et responsables de

Maintenance »). Sur le plan des méthodes se formalisèrent les notions de maintenance corrective, systématique et préventive.

De 1940 à 1970

Le rôle majeur joué par les équipements technologiques durant la Deuxième Guerre mondiale, aussi bien que le gigantesque effort industriel qu'il impliquait, furent un puissant accélérateur dans l'évolution de la maintenance. En particulier Pearl Harbour posa un challenge fantastique aux Américains : comment développer en quelques mois à partir de presque rien la plus grande industrie d'armement du monde, comment mettre au point des matériels robustes, faciles à exploiter et à maintenir par des soldats inexpérimentés, comment former rapidement les spécialistes nécessaires, comment mettre au point la logistique de support. De cette époque date vraiment la prise en compte des impératifs de fiabilité, disponibilité et maintenabilité dès la conception des équipements, par exemple par une standardisation drastique des équipements et des méthodes, la rédaction de notices bien adaptées au niveau des exécutants, et l'emploi des méthodes audio-visuelles de formation.

La reconstruction et l'effort de développement industriel de l'après-guerre nécessitaient une efficacité accrue. En France, ce fut le temps du rassemblement des forces en de grands ensembles industriels publics ou privés, permettant une stratégie cohérente et à long terme (EDF, Renault, Charbonnages, Sidérurgie, aviation...). Il fut décidé de s'inspirer de l'efficacité américaine par les fameuses « missions de productivité » aux USA, qui ramenèrent des méthodes d'action qui ont durablement modelé l'industrie française.

La Maintenance fut enfin reconnue comme un acteur majeur, d'autant plus que le matériel devenait plus sophistiqué. Deux grandes conceptions de maintenance s'opposaient : la maintenance décentralisée, où le personnel de maintenance d'un atelier est sous l'autorité de son chef de fabrication ; et la maintenance centralisée, où la totalité du personnel de maintenance relevait d'une hiérarchie distincte, en étant entièrement sous les ordres d'un Ingénieur en Chef de la maintenance, véritable responsable de l'état des équipements devant la Direction et la Fabrication. La première conception entraînait souplesse et rapidité d'exécution, au prix d'un excès de moyens humains et d'un manque de cohérence sur le plan de l'établissement, sacrifiant parfois la qualité de l'intervention à la rapidité : elle s'imposait là où il fallait d'abord produire plus. La deuxième permettait une plus grande cohérence et un meilleur emploi des moyens disponibles : par contre elle était plus lourde, et créait souvent une tension entre maintenance et fabrication : elle s'imposait là où il fallait d'abord produire moins cher.

L'après-guerre vit aussi apparaître les Cabinets d'organisation, dont plusieurs se spécialisèrent dans la maintenance. Il en résulta la mise au point des routines de gestion propres à cette activité, caractérisée par un grand nombre de petites interventions qu'il faut organiser, planifier, lancer, suivre, chiffrer et garder en historique, tout en faisant face chaque jour à l'imprévu, qui bouleverse souvent la hiérarchie des urgences. Le rôle du Bureau Technique central (ou Bureau des Méthodes) s'accrut, et les routines se traduisaient par une multitude de formulaires en « n » exemplaires, de circuits et de couleurs différentes, à tel point que beaucoup considéraient la Maintenance comme une « bureaucratie technique ».

C'est aussi à cette époque que, sous l'influence des Cabinets d'organisation, il apparut le besoin de communiquer : les ingénieurs de maintenance commencèrent enfin à écrire des livres sur leur métier, des magazines spécialisés apparurent.

Des métiers nouveaux apparurent, et prirent une place de plus en plus grande : contrôle et instrumentation (I&C), électronique. Ceci posa une autre réflexion sur l'organisation de la Maintenance : passant d'une base de répartition par spécialité professionnelle à une base de répartition par secteur géographique. Historiquement, au XIX^{ème} siècle la Maintenance était purement mécanique : au début du XX^{ème} siècle apparut l'électricité ; puis vers 1950 l'instrumentation et l'électronique. Les services de maintenance s'organisaient donc, par raison historique, en trois services différents: le service mécanique, le service électrique, le service instrumentation, séparés comme trois couches géologiques successives sur un terrain. Le mélange de plus en plus étroit de ces techniques imposa une répartition par secteurs géographiques, à l'intérieur desquels ces trois spécialités étaient intimement mélangées. La première application fut en 1958 dans la nouvelle sidérurgie de Dunkerque (Usinor, maintenant Arcelor-Sollac), où furent fusionnés par secteurs Electricité et Mécanique.

Cette période vit aussi la première application de l'informatique (computer technology) à la Maintenance : la gestion des stocks de pièces de rechange : c'était la grande époque des cartes perforées et des « listings » épais, cauchemar des femmes de ménage chargées du nettoyage.

Sur le plan de la technologie, l'évolution fut l'apparition des séquences d'automatismes, de l'électronique, de l'emploi des matières plastiques, le développement des techniques de rechargement par apport de métal, et le développement des circuits hydrauliques à haute pression, qui posa bien des problèmes, avant de voir que la solution passait par l'usage d'huiles ultrapures.

De 1970 à nos jours

Le bouleversement de la Maintenance est devenu considérable. Il continue de se faire.

D'abord, par l'extension du nombre d'acteurs. A côté du personnel de maintenance des usines, se sont développés les Services Après-Vente, les consultants en organisation de maintenance, les sous-traitants en maintenance (contractors), les enseignants et les chercheurs en maintenance, les fabricants de matériels spécialisés pour la maintenance, etc.

Il a surtout été ressenti le besoin de développer la communication sur le plan international, qui a conduit en 1970 à la création de la Fédération Européenne des Sociétés Nationales de Maintenance (EFNMS) dont les Congrès Euromaintenance permirent la diffusion extensive des nouvelles techniques et des nouvelles approches. Par la suite fut fondée la Fédération Ibéro-américaine de Maintenance (FIM), pour les pays de langue espagnole et portugaise.

C'est ainsi qu'au 4^{ème} Euromaintenance à Londres en 1978, la maintenance internationale découvrit ces progrès considérables qu'ont été le Condition Monitoring, les méthodes du Life Cycle Costing, du Life Cycle Profit, et la Total Productive Maintenance initiée par les Japonais. L'échec de la tentative de glossaire multi-langues des termes de maintenance fit découvrir l'importance de la terminologie, puisqu'il est inutile de chercher la traduction d'un mot d'une langue dans une autre, quand ceux qui parlent cette langue ne sont pas d'accord entre eux sur la signification précise de ce mot. Cet échec entraîna une conséquence positive, qui commença en France : la mise au point par l'AFNOR des normes de maintenance, en commençant par la terminologie, normes qui furent redéfinies au niveau de l'Europe (CEN).

Les gouvernements des pays s'intéressèrent à la maintenance, ainsi que les organismes internationaux UNPD et UNIDO, soucieux de développer la maintenance dans les pays en développement. Dans plusieurs pays, tels que la France, l'enseignement de la maintenance, depuis le niveau de l'ouvrier jusqu'à celui de l'ingénieur se développa vite, puisqu'on vit à la fois que le besoin devenait plus intense, et que la spécialité de maintenance n'était pratiquement pas sujette au chômage. En France, le premier Institut Universitaire de Technologie enseignant la Maintenance industrielle ouvrit ses portes en 1978. Il en existe actuellement plus de 25, ainsi que 110 lycées techniques où l'on forme des ouvriers qualifiés et des techniciens de Maintenance, y compris dans les métiers à double spécialité : électromécaniciens et « mécatroniciens » (mécanique et électronique). 17000 diplômes sont ainsi délivrés chaque année. La formation continue, avec certification, se développe également.

Le rôle des Bureaux Méthodes (ou Bureaux Techniques) de maintenance, chargés d'étudier et réaliser les actions de progrès fut accru : les entreprises y mirent leurs meilleurs ingénieurs.

Pour réduire le rôle bureaucratique du papier dans la maintenance, IBM mit au point dès 1978 avec la Société Industrielle des Silicones un logiciel (software) de gestion de maintenance assisté par ordinateur (GMAO, en anglais CMMS) : mais le matériel était encore trop lourd à l'époque. L'invention du PC leva cet obstacle et fit « exploser » le nombre de logiciels, jusqu'à ce que la concurrence en réduise le nombre. Le stade actuel est l'intégration – difficile – de la maintenance dans les grands systèmes ERP (Enterprise Resource Programmes), tels que SAP ou ORACLE. Maintenant il n'est plus de gestion de maintenance sans ordinateur, et le développement des Palm Pilots permet un meilleur dialogue avec les intervenants. Les systèmes de communication internes Intranet se sont généralisés.

La méthode japonaise TPM, qui fut un outil majeur de développement de l'industrie automobile japonaise, se répand rapidement. Elle change radicalement l'approche de la maintenance autant que l'exploitation : d'une part, elle apprend à travailler sur des objectifs communs, d'autre part elle fait du personnel ouvrier un acteur majeur du changement.

La recherche permanente de réduction des coûts s'est traduite en maintenance, surtout depuis 1990, par un développement intensif de la sous-traitance (« contracting »), qui va parfois jusqu'à l'« outsourcing », quand on confie au sous-traitant la totalité de la maintenance d'une installation. Il semble qu'on ait été parfois trop loin dans cette voie, et qu'il est parfois dangereux d'abandonner son savoir-faire (know-how) en maintenance à une société extérieure. De même, la détérioration de la situation du personnel sous-traitant sur le plan des accidents de travail a conduit aux systèmes d'« assurance-sécurité » pour les sous-traitants.

Une autre évolution est le développement fantastique en trente ans des systèmes de « condition monitoring », pour suivre l'état de santé des machines, tant par le développement des techniques d'examen (analyse de vibrations, télévision infra-rouge, analyse des huiles, endoscopes, ultrasons, émission acoustique, « eddy currents » etc..) que par le suivi par ordinateur de tous ces paramètres. Ceci permet de suivre en permanence l'« état de santé » d'un équipement, ou d'un ensemble d'équipements, et de n'intervenir que quand cela est nécessaire, en ayant une idée précise du diagnostic.

Le besoin est de plus en plus grand d'équipements fiables (reliable), disponibles (available), facilement maintenables et sûrs : ce qui fait collaborer les services de maintenance avec les bureaux d'études, pour assurer le retour d'expérience (feed-back) dans les études

préliminaires RAMS (Reliability, Availability, Maintainability, Safety). La sûreté de fonctionnement est étudiée dans les équipements existants par les études d'Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC, en anglais FMECA), pour assurer une maintenance centrée sur la fiabilité (RCM : Reliability Centered Maintenance).

Par ailleurs, l'internationalisation se traduit souvent pour la maintenance par l'adoption de nouvelles normes et le changement d'habitudes : en particulier quand il a fallu en 2002 abandonner les règles de base appliquées depuis plus de 75 ans pour les équipements sous pression, et s'adapter à un système européen totalement différent, et souvent plus contraignant. Il en est de même pour la participation de la Maintenance à l'élaboration, dans chaque établissement, du Document Unique pour la prévention des risques professionnels

La Maintenance se développe dans d'autres domaines que l'industrie ou les transports. En effet, depuis les années 1990, notamment depuis l'Euro maintenance 1996 à Copenhague, s'est révélée la nécessité de développer les techniques de maintenance immobilière, pour bien maintenir le bon état des immeubles, tant en ce qui concerne le génie civil que le nombre de plus en plus grand d'équipements industriels dans les immeubles (climatisation, électronique de surveillance, ascenseurs, etc.). Un secteur particulier est en plein développement est la maintenance hospitalière. Non seulement, les instruments d'assistance aux malades doivent avoir une fiabilité parfaite, mais de plus ils ne doivent pas contenir de microbes dangereux.

Enfin, le début du XXI -ème Siècle voit se développer dans la maintenance une nouvelle préoccupation, celle de l'environnement : depuis la bonne gestion des déchets (refuses), des produits dangereux, de l'énergie et du risque d'accident industriel (règles « Seveso »).

La conclusion de tout cela est que la maintenance évolue et se complique, ce qui exige de plus en plus d'actions, avec des budgets de plus en plus réduits, et un besoin de plus en plus grand de formation et de communication.

Mais les principes de base définis par Frontin sont toujours valables : ils constituent le tronc de l'arbre, sur lequel les évolutions actuelles font pousser des branches de plus en plus nombreuses...

Gerard Neyret

Ecole Centrale Paris Vice-Président de l'Association Française des ingénieurs responsables de Maintenance (AFIM)

Expert Technologia