

# Les maintenances préventives et prédictives en carrières

**Jean-Michel ARNAUD**

Directeur-adjoint de la Société SITIA à Nantes

**Patrick CHENIN**

Maître de conférences à l'Université Joseph Fourier  
à Grenoble - Directeur-adjoint à l'IUP  
Mathématique Appliquée et Industrielle à Grenoble

**Mohamed CHERFAOUI**

Chef du service Contrôle non destructif

**Joseph COURANT**

Directeur de la Société des Carrières de Cléré-sur-Layon

**Marc DESCHAMPS**

Technicien supérieur du Service Contrôle non destructif,  
Centre technique des industries mécaniques  
Centre technique des industries mécaniques à Senlis

**Jean-Bernard DUCASSOU**

Technicien supérieur à la Section Élaboration des granulats,  
Laboratoire central des Ponts et Chaussées,  
Centre de Nantes

**Marcel LIZÉE**

Technicien de l'Unité Carrières et granulats  
Laboratoire régional des Ponts et Chaussées d'Angers

**Alain MALDONADO**

Chargé de Mission auprès du Directeur technique  
géotechnique - Directeur de recherche  
Laboratoire central des Ponts et Chaussées

## RÉSUMÉ

La maintenance occupe une place importante dans les coûts de fonctionnement des installations de production de granulats. Une politique de maintenance mal conçue a souvent des conséquences désastreuses sur la qualité en termes de régularité, d'homogénéité et de risques concernant l'environnement.

Le Laboratoire central des Ponts et Chaussées, associé à un partenariat européen (programme Brite), vient de terminer un projet de recherche sur *La maintenance préventive et prédictive en carrières* qui a permis la réalisation sous forme de prototypes d'un système d'identification de l'état d'usure des roulements des concasseurs et des cribles, d'un simulateur et d'un logiciel de calcul de la fiabilité des installations. L'article décrit le déroulement du travail et les produits développés.

**MOTS CLÉS :** 36 - 60 - Carrière - Granulat - Fabrication - Maintenance - Prévention - Prévision - France - Europe - Coût - Projet de recherche - Usure - Concassage - Criblage - Équipement - Logiciel - Calcul - Simulation - Fiabilité.

## Introduction

La maintenance constitue la partie la plus importante des coûts opératoires dans les installations de production de granulats et plus généralement dans l'industrie des procédés. Ces dépenses peuvent être comprises entre 15 et 40 % des coûts variables. En carrières, elles sont d'autant plus « importantes » que les matériaux à traiter sont abrasifs.

Des études récentes ont montré qu'un tiers de ces coûts avait pour origine des opérations mal effectuées ou inutiles. Il apparaît donc que la réduction des pertes économiques se rapportant à la maintenance représente un enjeu important pour augmenter la productivité et le profit des entreprises.

Une mauvaise politique de maintenance a également des conséquences désastreuses sur la qualité des produits en termes de régularité et d'homogénéité. Une entreprise qui ne maintient pas son outil de fonctionnement en bon état prend des risques de différentes natures : risques techniques, risques concernant la sécurité des personnes, risques à l'égard de l'environnement et risques financiers.

C'est parce qu'il a semblé que, dans l'esprit des responsables de production en carrières, la maintenance semblait être, à tort, un « mal nécessaire » que le Laboratoire central des Ponts et Chaussées (LCPC) associé à un partenariat européen a présenté un projet de recherche (projet Edmond BE 5332) sur le thème de la maintenance préventive et prédictive en carrières. Ce projet a été retenu dans le cadre du programme Brite (Basic Research for Industrial Technology in Europe) en 1993 et s'est terminé en 1996.

## Les objectifs du projet Edmond

Le projet Edmond avait pour but de réaliser un système de maintenance (fig. 1) comprenant un certain nombre d'outils, capteurs ou logiciels destinés à :

- réduire ou éliminer les réparations inutiles,
- éviter les pannes des machines les plus importantes pour la production (celles dont dépend tout le fonctionnement de l'usine),
- favoriser l'abandon d'une politique de maintenance corrective, qui se révèle généralement onéreuse, au profit d'une maintenance prédictive,
- faciliter la gestion d'une maintenance préventive basée sur des données fiables,
- mettre enfin en application, pour le remplacement des pièces les plus importantes, une poli-

tique de maintenance plus « intelligente ». Cette dernière est basée dans toute la mesure du possible sur la quantification des pertes de rendement des machines ou de celles de l'unité de fabrication.

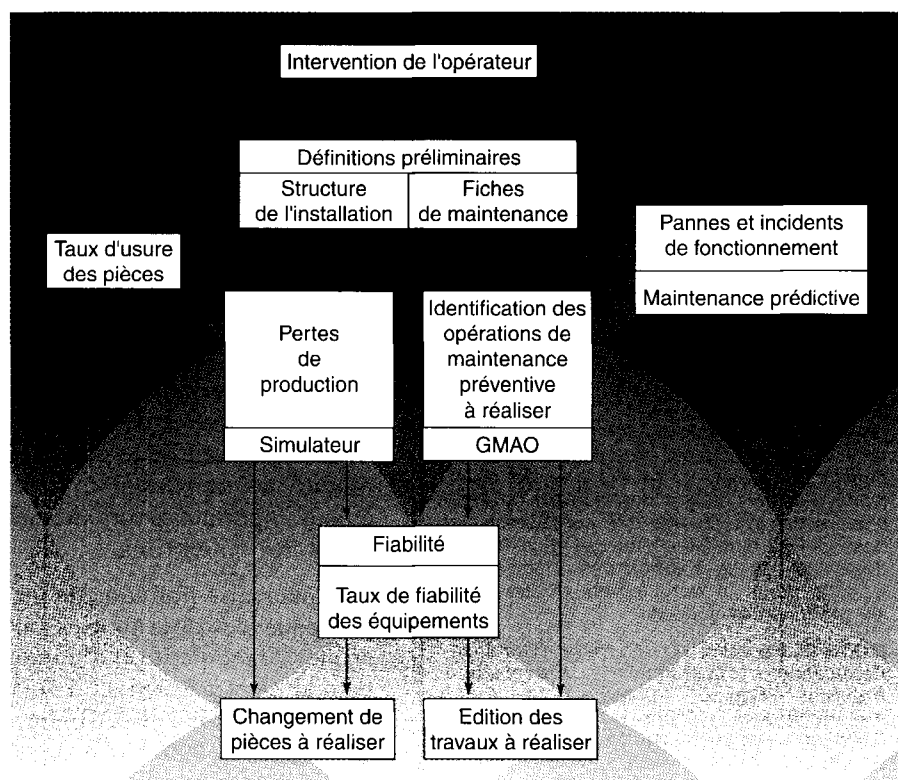
C'est donc de façon globale que le groupe en charge du projet Edmond a souhaité aborder le problème de la maintenance en carrière.

Les efforts de recherche ont porté sur :

- la réalisation de capteurs d'usure des roulements et paliers relatifs à la cinétique, des concasseurs et cribles,
- l'élaboration d'un simulateur prenant en compte l'influence des opérations de maintenance et de l'usure des pièces broyantes sur la production,
- la mise en œuvre d'une méthode de calcul des taux de fiabilité ou de disponibilité d'une installation pour, *in fine*, pouvoir faire des choix de matériels ou de configuration de chaîne de traitement,
- l'adaptation d'un logiciel de gestion de la maintenance assistée par ordinateur à la problématique existant en carrière.

Les travaux effectués ont donc eu pour objectif de réaliser des outils destinés à contrôler puis à diminuer les coûts directs et indirects de la maintenance (main d'œuvre, défauts de qualité) et de favoriser l'amélioration des conditions de travail.

Fig. 1 -  
Les opérations concernant  
les produits du projet  
Edmond.



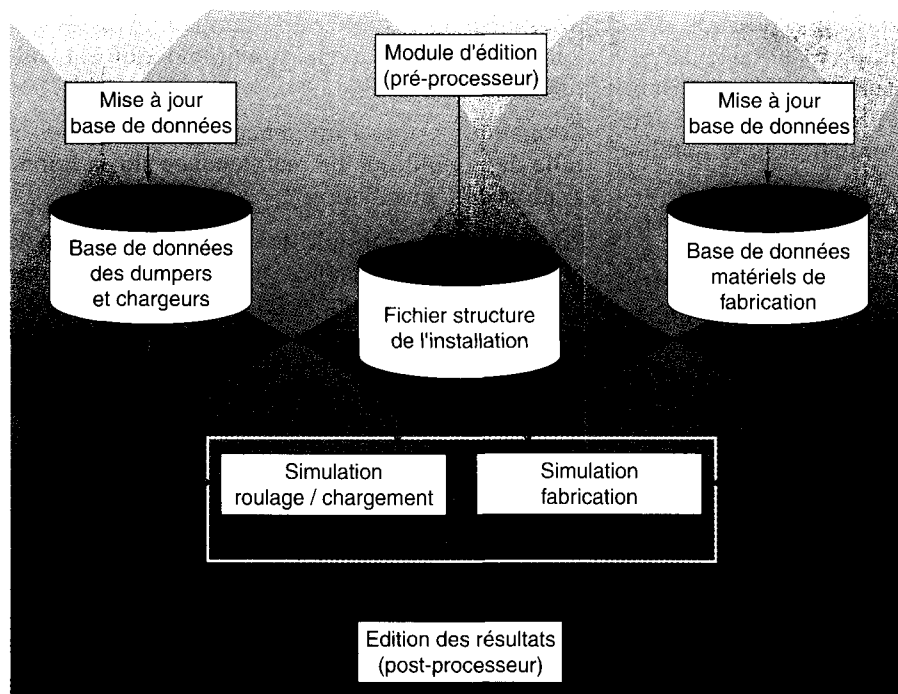


Fig. 2 -  
Structure du simulateur  
SUPER LUCIE.

## Les outils réalisés

Le projet Edmond BE 5332, dont le titre est *Maintenance préventive et prédictive d'unités de production de granulats*, s'est déroulé sur une période de quarante mois, du 1<sup>er</sup> janvier 1993 au 18 juin 1996. Les travaux de recherche réalisés ont permis le développement des quatre prototypes suivants :

*Un logiciel de simulation réalisé par la société SITIA*

Le logiciel prototype de simulation (SUPER LUCIE) permet la définition de la structure d'une installation, du front de taille aux produits finis, puis le calcul de l'influence d'arrêts d'appareils et de l'usure des pièces broyantes des concasseurs sur la production.

Le logiciel (fig. 2) se compose des modules suivants :

- un module d'édition (ou pré-processeur), permettant la création interactive par l'utilisateur de la structure de son installation. Pour ceci, des icônes correspondant à chaque machine élémentaire (dont les modèles mathématiques ont été développés) sont assemblés par l'opérateur. Ce module permet également de définir les caractéristiques et les réglages de différentes machines composant les circuits de l'installation, par l'accès à une base de données. Ce module est développé sous Windows, en Visual Basic ;

- un module de mise à jour de la base de données : les valeurs des paramètres des modèles mathématiques des machines élémentaires sont stockées dans une base de données. Cette der-

nière est accessible à l'utilisateur afin qu'il puisse la personnaliser en introduisant des données relatives aux machines qui sont utilisées sur son site de production. Ce module est développé en utilisant le gestionnaire de bases de données Fox-Pro ;

- un module de simulation (ou solveur) calculant, pour l'installation définie par l'opérateur, et en utilisant les modèles mathématiques des diverses machines, le bilan de production. Ce module est développé sous forme d'une DLL (Dynamic Link Library), en langage C++ et en utilisant les concepts de la Programmation Orientée Objet.

Ce solveur est divisé en deux parties : la partie « roulage/chargement » et la partie « installation » :

— Partie « roulage/chargement »

Cette partie inclut la simulation des équipements permettant le chargement des matériaux au front de taille et leur transport jusqu'au poste primaire (chargeurs, tombereaux), en fonction de leurs caractéristiques et performances contenues dans la base de données et en fonction du profil de la piste défini par l'opérateur (nombre et caractéristiques de chacun des tronçons). Le résultat de cette simulation est la détermination du débit maximum provenant du front de taille, destiné à l'alimentation de l'installation.

— Partie « installation »

Cette partie calcule l'équilibre, au sens du flux, de l'installation de fabrication (du concasseur primaire aux produits finis), pour une combinaison donnée des réglages des diverses

machines (serrage des concasseurs, position des volets d'orientation des flux de matériaux, etc.). De plus, chaque machine peut être affectée d'un coefficient de disponibilité, afin de prendre en compte, au niveau de la simulation, une défaillance éventuelle.

➤ un module d'affichage des résultats (ou post-processeur) qui permet la visualisation à l'écran des grandeurs caractérisant la production (débits et granulométries en tout point de l'installation définie par l'opérateur).

*Un logiciel de calcul de fiabilité réalisé par le Laboratoire de modélisation et de calcul - Institut d'informatique et de mathématiques appliquées de Grenoble (LMC-IMAG) de l'Université de Grenoble*

Le logiciel de calcul de fiabilité fonctionne également sur micro-ordinateur. Il permet :

➤ de définir la structure d'une installation en termes de flux de production, d'arbre de défaillances ou d'incidents. Il met en œuvre la méthode des graphes de Markov. Cet outil facilite l'étude prévisionnelle des divers incidents susceptibles de se produire ;

➤ d'enregistrer les événements relatifs aux incidents et de traiter ces données afin de calculer les paramètres des modèles probabilistes.

Un système de production est sujet à divers types d'incidents qui modifient, volontairement ou non, la production en termes de quantité et de qualité. Sur un site de production de granulats, ceci peut être :

- des pannes sur certains matériels ;
- des modifications des caractéristiques des matériaux traités (en composition, en dureté, en granulométrie, en débit, en hygrométrie) ;
- des modifications de réglages d'une machine ou de l'installation, liées à une décision ou à un phénomène d'usure ;
- les conditions climatiques ;
- des réparations de matériels défaillants.

De façon rapide, on peut appeler « défaillance » tout fait ayant un effet négatif sur la production et « réparation » tout acte permettant, après une défaillance, de ramener la production à son état antérieur. Ainsi, un indicateur de la fiabilité de l'installation est le temps de disponibilité de l'installation ce qui se traduit par l'étude de la fonction  $R(t)$  définie par :

$R(t)$  : Probabilité  $\{(S \text{ non défaillant sur } [0, t])\}$

Sachant que le système de production est en bon fonctionnement à l'instant 0,  $R(t)$  est la probabilité pour que le système soit non défaillant pendant l'intervalle de temps  $[0, t]$ .

$R(t)$  est une fonction non croissante variant de 1 à 0 sur  $[0, \infty]$ .

Un indicateur résumé est le temps moyen de bon fonctionnement, valeur numérique qui est calculée à partir de  $R$ .

Comment mesurer l'influence des défaillances et celle de la politique de maintenance sur la bonne gestion de l'installation ?

Pour cela, il est possible de compter le nombre de défaillances de chaque machine pendant une période donnée, d'améliorer la surveillance ou la maintenance des machines les plus défaillantes et d'observer le résultat, mais cette analyse très simple ne donne guère d'information sur les causes réelles des défaillances et n'établit que difficilement l'importance relative des causes des incidents sur la fiabilité globale de l'installation.

C'est pourquoi le projet Edmond s'est proposé de réaliser cette étude par le biais de la simulation de la façon suivante.

À l'installation est associée un graphe (dit *graphe de Markov*) dont les sommets caractérisent un état de l'installation (par exemple : bon fonctionnement général, le primaire est à l'arrêt, trémie pleine, concasseur en panne, etc.) et les arcs du graphe portent les paramètres des lois de probabilités de passage d'un état à un autre (en général, étant donné deux sommets A et B, nous aurons un arc de A vers B pour la probabilité de panne et un autre de B vers A pour le temps moyen de réparation). Un calcul (non trivial et acceptable sous certaines hypothèses) permet alors d'évaluer la fonction  $R(t)$ .

Par ailleurs, la grande variété des structures d'installations de production de granulats observées dans trois pays de l'Union européenne, pendant la première phase du développement du projet Edmond, nous a conduit à concevoir un logiciel de simulation probabiliste accompagné de facilités permettant d'observer les incidents pour l'identification de certains paramètres par des méthodes statistiques.

Ainsi, le logiciel développé dans le cadre du projet Edmond permet de :

- décrire la structure de fonctionnement de l'installation à l'aide d'une analyse descendante ;
- décrire un arbre des incidents significatifs et observables sur l'installation ;
- décrire un graphe des états de l'installation avec les lois de transition associées ;
- calculer la fonction de fiabilité en fonction des paramètres des lois de transition ;
- enregistrer les incidents observés sur une installation au moyen d'un cahier journal et réaliser des statistiques autorisant l'identification des paramètres associés aux lois de transition.

Nous avons donc réuni, au sein d'un même logiciel, divers outils facilitant l'analyse des inci-

dents au moyen du cycle observation-simulation-observation et qui doit permettre les prises de décision concernant la gestion de la maintenance et de la surveillance d'une installation.

Ce logiciel a été développé à l'aide d'une base de données et d'un langage de programmation pour fonctionner sur des matériels largement répandus sur les sites industriels. Son utilisation fonctionnelle a été testée sur le site de Cléré, ce qui a conduit à adapter certains aspects d'interfaces du logiciel. Il reste à valider les analyses statistiques et probabilistes, ce qui est en cours de réalisation.

#### *Un logiciel de gestion de la maintenance assistée par ordinateur*

Le logiciel de Gestion de la maintenance assistée par ordinateur (GMAO) assure la gestion préventive de la maintenance. Ce logiciel permet :

- de définir les équipements devant subir des interventions ;
- de définir les tâches à réaliser ;
- d'associer à chaque équipement la liste des tâches de maintenance qu'il doit subir, avec leur période de réalisation ;
- de déterminer, sur une période donnée par l'opérateur, la liste des opérations d'entretien à réaliser et d'éditer les ordres de travaux correspondants ;
- d'éditer des grandeurs statistiques et historiques relatives aux équipements.

#### *Un dispositif de maintenance prédictive réalisé par le Centre technique des industries mécaniques*

La surveillance en cours de fonctionnement de l'usure des roulements a des conséquences bénéfiques directes sur la disponibilité des concasseurs, leur sécurité et leur bon fonctionnement. Bien utilisée, la technique d'émission acoustique peut relever ce défi. Effectivement, cette technique est déjà utilisée pour suivre la détérioration de roulements de petit diamètre, ayant des vitesses de rotation élevées. La spécificité de la surveillance de l'usure des roulements de concasseurs est liée au diamètre important de tels roulements et à leur faible vitesse de rotation.

### **Principes de l'émission acoustique**

Suivant la définition de la norme AFNOR **NF A 09-350** « *L'émission acoustique est un phénomène de libération d'énergie sous forme d'ondes élastiques transmises au sein d'un matériau soumis à sollicitation* ».

Autrement dit, l'émission acoustique est analogue à l'activité sismique enregistrée sur la terre, activité révélatrice de ruptures localisées de l'écorce terrestre par suite d'accumulations de contraintes dépassant la résistance du matériau.

La détection et l'analyse des signaux d'émission acoustique permettent d'obtenir des informations inédites sur les anomalies du champ de contraintes, liées par exemple à la présence de défauts.

Elle diffère des techniques usuelles de contrôle non destructif pour plusieurs raisons :

- > le matériau génère lui-même le signal à analyser : ceci implique la nécessité de prendre en compte les caractéristiques mécaniques et métallurgiques du matériau avant d'envisager une application de l'émission acoustique ;
- > un signal d'émission acoustique ne peut être obtenu que si la structure est sollicitée (surveillance en fonctionnement, par exemple) ; dans ces conditions, seuls des défauts actifs peuvent être détectés ; l'état de contrainte autour du défaut est donc essentiel ;
- > l'émission acoustique peut révéler la présence d'un défaut, voire donner sa position dans la machine à surveiller et parfois, si les données de référence sont suffisantes, graduer sa nocivité ; en aucun cas l'émission acoustique ne vise à décrire la géométrie du défaut (profondeur, largeur, longueur, forme...) ;
- > une structure de grande dimension est contrôlable par émission acoustique en une seule opération au moyen d'un nombre limité de capteurs ; il n'est pas nécessaire que les zones critiques à contrôler soient accessibles directement ;
- > l'émission acoustique n'est pas simplement une technique de contrôle non destructif : fondamentalement, il s'agit d'une technique de surveillance puisque l'émission d'ondes ultrasonores est étroitement associée aux mécanismes physiques qui accompagnent l'initiation et la propagation des défauts.

### **Travaux réalisés**

Dans le cadre du projet Edmond, les travaux du Centre technique des industries mécaniques (CETIM) ont eu pour but la conception et la réalisation d'un système de maintenance prédictive. Ce système est basé sur la fabrication de capteurs spécifiques et le développement d'une chaîne d'acquisition avec son logiciel associé.

#### *Instrumentation des concasseurs*

Plusieurs campagnes de mesures ont été réalisées sur différentes machines (fig. 9).

Afin de couvrir une large gamme de concasseurs et d'étudier les différentes conditions d'essais, cinq études ont été menées en parallèle :

- Dragados (Espagne) - Concasseur LARON ARAB
- Frias (Portugal) - Concasseur OMNICON
- Bergeaud (France) - Concasseur OMNICON
- Dragon (France) - Concasseur DRACAR
- Neyrtec (France) - Concasseur GRAVIMATIC

Chaque concasseur est équipé de plusieurs capteurs détecteurs d'émission acoustique. Un capteur programmé permet un auto-contrôle permanent du bon fonctionnement du système d'acquisition et de traitement des données (fig. 3). À l'aide de thermocouples placés à proximité des paliers ou roulements, des mesures de température ont également été effectuées.

## **Influence des paramètres étudiés**

### **La température**

Les essais réalisés ont montré que la température est une donnée particulièrement instable et difficilement utilisable dans un cadre industriel. Celle-ci est liée à la fois :

- au temps de fonctionnement,
- à la température extérieure.

L'influence des conditions d'utilisation de la machine (serrage-débit) reste très faible par rapport aux variations de température liées au temps de fonctionnement.

### **Influence des conditions de chargement**

L'opération de concassage produit localement au niveau de chaque caillou une libération importante de contrainte qui passe dans le bâti sous forme d'ondes ultrasonores, qui peuvent masquer l'émission acoustique produite par le roulement lui-même.

Cette observation souligne l'importance des conditions d'alimentation du concasseur et permet d'expliquer la grande différence observée entre les mesures à vide et les mesures en charge.

Dans ces conditions, l'examen des paramètres des signaux d'émission acoustique relevés en charge ne peut pas être utilisé pour l'évaluation des conditions d'usure des roulements.

Après l'analyse des acquisitions, une méthodologie a été développée. Elle consiste à analyser les signaux enregistrés lors du fonctionnement à vide qui ne sont pas influencés par le processus d'écrasement des matériaux, même si le niveau de chargement des roulements est alors minimum.

### **Comparaison des signatures des roulements neufs et usés**

Un roulement à l'état neuf n'est en principe pas endommagé. Par conséquent, il ne comporte pas de défauts évolutifs. Un roulement usé, en fonction du degré de l'usure, va donner naissance à des défauts localisés. Ces défauts évoluent en cours de fonctionnement, mais le processus d'endommagement est lent. Ces défauts vont générer des ondes ultrasonores qui, recueillies par les capteurs, sont analysées par la chaîne d'émission acoustique.

### **Analyse temporelle**

Compte tenu des éléments définis plus haut, la comparaison entre roulements neufs et usés est établie sur les signaux enregistrés en marche à vide. On remarque une différence très nette de la moyenne des niveaux maximaux de l'émission acoustique, après changement des roulements (différence supérieure à 20 dB).

Malgré la durée du projet (trois ans), les indications obtenues restent ponctuelles en regard de la durée de vie des roulements (15 000 à 20 000 heures). Les observations effectuées ne sauraient fournir d'indications sur l'évolution de l'usure dans la mesure où les données recueillies concernent des roulements en fin de vie et des roulements neufs. Pour envisager un suivi de l'usure, il y a lieu de connaître l'évolution du niveau d'émission acoustique entre ces deux points extrêmes.

### **Analyse en fréquences**

Les roulements sont sujets à deux types de défauts :

- les défauts qui se manifestent de façon aléatoire dans le temps,
- les défauts ponctuels, qui génèrent des chocs à chaque passage en coïncidence entre un défaut et un élément roulant.

À l'état précoce de détérioration, les roulements présentent surtout des défauts ponctuels, alors que les défauts aléatoires correspondent généralement à un état de dégradation avancé.

Les fréquences caractéristiques des défauts ponctuels peuvent se déduire des mouvements dans les roulements. Les défauts aléatoires n'étant, par définition, pas liés au temps, ne produisent pas de fréquences caractéristiques, mais contribuent à l'augmentation du bruit de fond de l'analyse en fréquence.

L'observation des spectres de fréquence relevés à vide, sur un roulement en fin de vie, montre une augmentation importante des raies caractéristiques du roulement et du bruit de fond par rapport aux niveaux relevés sur un roulement neuf (fig. 4). Ces résultats permettent de développer un critère pour l'évaluation de l'usure des roulements.

### **Dispositif de maintenance prédictive**

Le système de surveillance développé est basé sur les caractéristiques de la chaîne de mesure utilisée lors de cette étude.

Le principe du dispositif mis en œuvre est le suivant :

Les signaux recueillis par les capteurs d'émission acoustique sont d'abord traités par un filtre adapté, puis certaines valeurs sont extraites

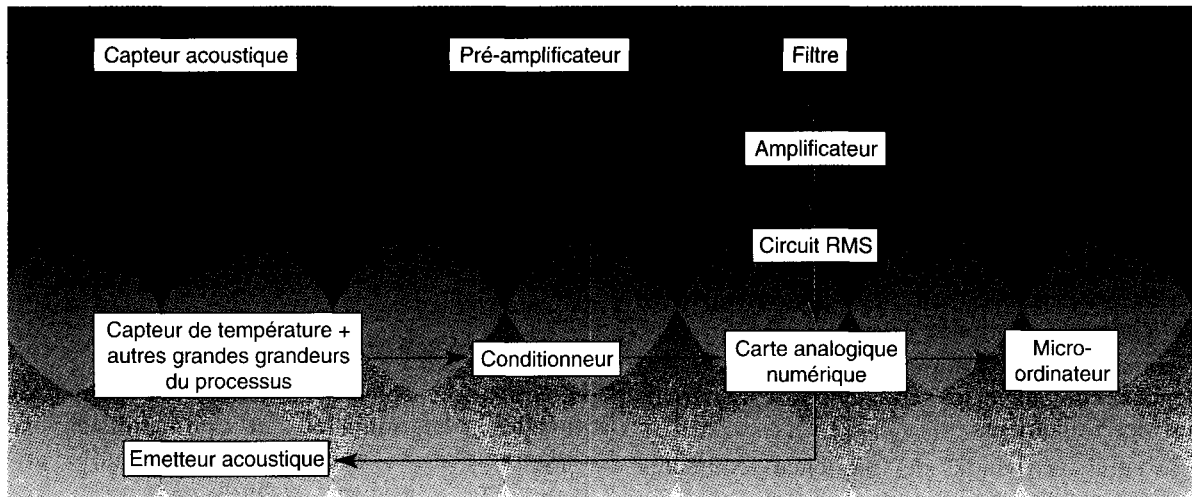


Fig. 3 - Exemple de blocs diagrammes d'appareils utilisés en carrières.

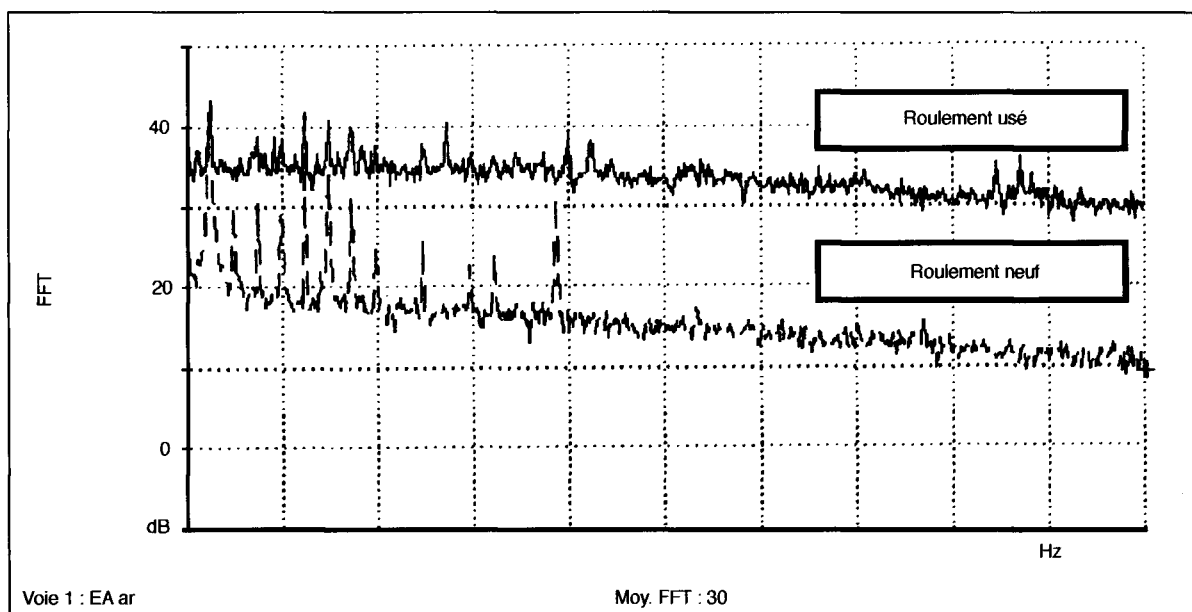


Fig. 4 - Émission acoustique comparée.

(valeur efficace...). Ces valeurs sont ensuite comparées au modèle de dégradation établi dans une phase d'apprentissage.

#### Matériel nécessaire

Étant donné l'environnement particulier des carrières, le matériel et notamment les capteurs doivent être particulièrement adaptés et leur robustesse éprouvée.

Le traitement analogique du signal issu du préamplificateur permet d'adapter le signal pour une numérisation avec les cartes d'acquisition classiques. Les signaux numérisés sont ensuite traités par un ordinateur type PC. L'ensemble des caractéristiques des éléments de la chaîne d'acquisition ont été définies dans ce projet.

#### Logiciel

Le logiciel permet de réaliser les tâches essentielles, à savoir le calibrage de la chaîne, l'acquisition et le traitement des signaux :

##### Analyse en temps réel et dans le temps des signaux

Un signal est caractérisé à l'aide de plusieurs paramètres. Les paramètres statistiques de l'amplitude sont utilisés pour s'assurer de la validité des signaux enregistrés sur site, de manière à éliminer un certain nombre d'erreurs caractéristiques :

- saturations,
- niveaux particulièrement fluctuants,
- parasites,
- distributions d'amplitude des signaux ne correspondant pas aux signaux habituels.

### *Analyse fréquentielle*

Les travaux réalisés dans le cadre de ce projet ont montré la nécessité d'utiliser certains paramètres déterminants tels que :

- le calcul de la moyenne des spectres de puissance de signaux observés dans une période de temps définie par l'opérateur ;
- l'analyse par bandes de fréquences pour intégrer les variations de vitesse ou transposition en fréquence des spectres ;
- le suivi de l'évolution des bandes de fréquences contenant les fréquences caractéristiques des roulements ;
- le suivi des bandes de fréquences contenant les éléments non périodiques...

### *Critères*

Pour chacun des paramètres définis, il est possible d'envisager un ou plusieurs seuil(s) :

- 1<sup>er</sup> seuil : indication
- 2<sup>e</sup> seuil : alarme
- 3<sup>e</sup> seuil : alarme avec arrêt...

Le critère final d'usure devra tenir compte du franchissement simultané de chacun des seuils par plusieurs paramètres dont la définition et les valeurs seuils exigent un apprentissage.

### **Premières conclusions**

Les travaux ont montré que l'examen des signaux d'émission acoustique relevés en charge n'est pas l'approche la mieux adaptée. En effet, ces signaux sont influencés par l'opération de concassage.

La méthodologie adoptée consiste à réaliser les mesures à vide. En effet, on mesure dans ces conditions, une différence de 20 dB entre les roulements neufs et des roulements en fin de vie. Ce résultat ouvre des perspectives très encourageantes quant à l'évaluation en temps réel de l'usure des roulements dans les carrières par émission acoustique. Un apprentissage sur des longues périodes est cependant nécessaire.

Le système développé pour la surveillance des roulements est très adapté aux conditions particulières liées à l'environnement spécifique des carrières.

### **Les contributions du Laboratoire central des Ponts et Chaussées et du réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées**

Les cinq tâches suivantes, décomposées en un certain nombre de sous-tâches, constituent le projet Edmond :

### **Tâche 1 : Identification et analyse critique des types de maintenance mis en œuvre en carrières**

Cette tâche avait pour but de caractériser les types de maintenances effectuées en carrières et de définir les données pertinentes à prendre en compte pour modéliser la fiabilité des outils mis en œuvre dans les exploitations.

### **Tâche 2 : Modélisation et simulation**

Le travail a consisté à mettre au point des modèles déterministes et probabilistes se rapportant à la maintenance des outils utilisés en carrières. L'utilisation de ces modèles dans des simulateurs permet de quantifier l'impact des opérations de maintenance sur la production. Cette tâche a permis la réalisation d'un logiciel de calcul de la fiabilité d'un système de fabrication des granulats.

### **Tâche 3 : Maintenance préventive**

Un logiciel de Gestion de la maintenance assistée par ordinateur (GMAO) a fait l'objet de développements destinés à la mise en pratique d'une maintenance préventive facilitée.

### **Tâche 4 : Maintenance prédictive**

Cette tâche a permis de recueillir des informations sur la dégradation des paliers et roulements de concasseurs ou de cribles et de réaliser un système de maintenance prédictive destiné à suivre l'évolution de l'usure des roulements.

### **Tâche 5 : Essais et évaluation**

La validation et la critique du travail réalisé ont été faites sur un site industriel.

Le Laboratoire central des Ponts et Chaussées, assisté des laboratoires régionaux de Strasbourg et d'Angers, est intervenu dans la réalisation de toutes les tâches. Le travail des laboratoires a porté sur :

- la détermination du bloc-diagramme des machines utilisées en carrières. Cette analyse fait apparaître les paramètres ayant une influence sur le comportement des machines (entrées), les grandeurs influencées (sorties). Les perturbations qui peuvent avoir une influence sur les performances de la machine (fig. 5) ont également été recensées. Ce travail a pour but de définir les modèles déterministes d'une installation de production ;



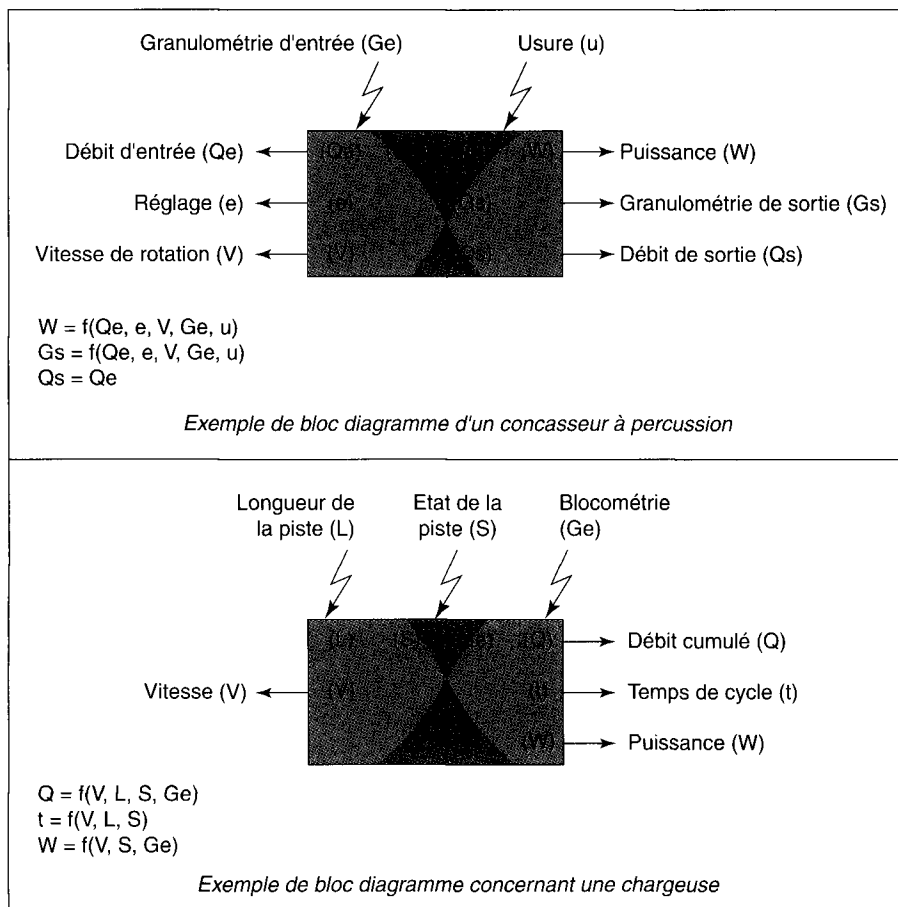


Fig. 5 -  
Exemple de blocs  
diagrammes d'appareils  
utilisés en carrières.

➤ la constitution d'une base de données réalisée sur plusieurs sites à partir d'un questionnaire complété grâce à l'aide des responsables industriels. Ce questionnaire a permis de définir les politiques de maintenance des entreprises. Il a fait apparaître, pour les machines, la nature et le coût des interventions de maintenance préventive, les pannes habituellement rencontrées et les actions correctives associées. Ce travail a eu pour but de définir les caractéristiques (cahier des charges) du logiciel de GMAO et les modèles probabilistes destinés au logiciel de calcul de la fiabilité ;

➤ la modélisation d'un poste primaire. Pour cela, une campagne de mesure a été réalisée sur une carrière au Portugal disposant d'un concasseur à mâchoires. Les données enregistrées ont permis d'établir le modèle déterministe de ce concasseur primaire. En associant un logiciel de gestion du transport par camions adapté pour la circonstance au logiciel LUCIE le simulateur (SUPER LUCIE) a été développé conformément au schéma de la figure 2. La campagne de mesures permettant de modéliser le concasseur primaire a été particulièrement difficile à mener car l'analyse portait sur des 0/250 mm. Les figures 6, 7 et 8 montrent successivement les phases de prélèvement, d'échantillonnage et de tami-

sage par l'équipe de la Section d'élaboration des granulats (SEG) du Laboratoire central des Ponts et Chaussées ;

➤ l'acquisition de données se rapportant à l'usure des paliers et des roulements de concasseurs et de cribles. La technique utilisée était basée sur les mesures de l'émission acoustique et de la température des pièces surveillées. Une instrumentation particulière a été préalablement mise en œuvre par le Centre technique des industries mécaniques (CETIM) sur plusieurs appareils (constructeurs différents) en fonctionnant sur plusieurs sites (capteur, préamplificateur, filtre et amplificateur, circuit RMS, carte analogique, numérique, micro-ordinateur). Une méthode de mesure a été également validée pour s'assurer de l'étalonnage des capteurs d'émissions acoustiques. La figure 9 présente l'équipement mis en place en carrière lors d'une campagne de mesures, près de Chambéry, sur un appareil choisi par un des industriels qui parraineraient le projet. Les campagnes de mesures sur les concasseurs ont permis de déterminer quelle peut être l'influence des conditions de fonctionnement des appareils sur les mesures effectuées. La campagne menée sur le crible, en station d'essais, a fait apparaître l'évolution de la densité spectrale des émissions d'un roulement neuf et d'un roulement usagé (fig. 10) ;

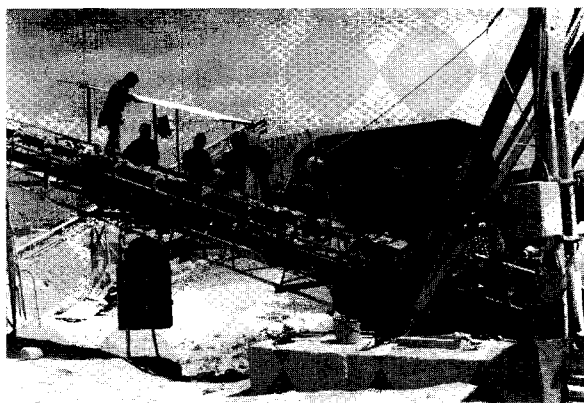


Fig. 6 - Prélèvement sur bande primaire au Portugal.



Fig. 7 - Échantillonnage de matériaux 0/250 mm primaires.



Fig. 8 - Tamisage des matériaux primaires.



Fig. 9 - Campagne de mesures sur site industriel près de Chambéry (France).

Fig. 10 - Analyse fréquentielle du signal donné par la dégradation d'un roulement

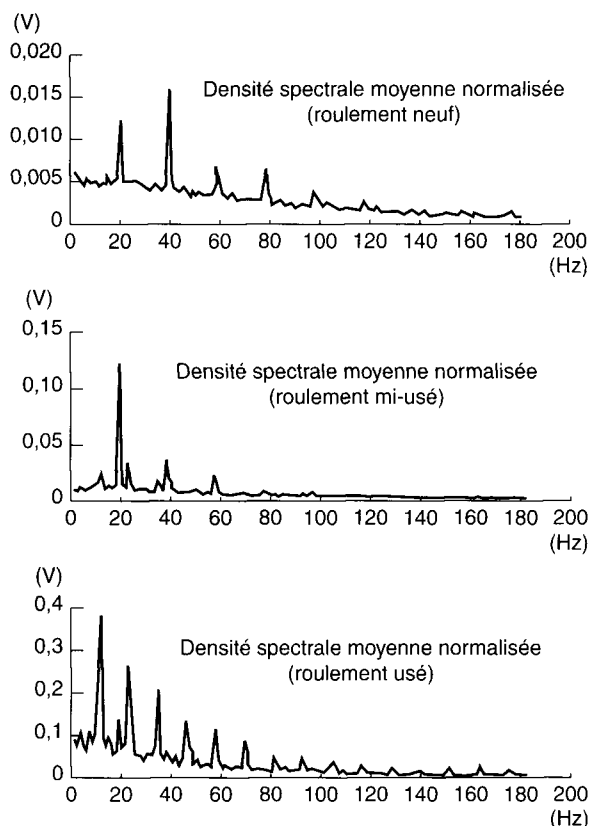


Fig. 10 - Analyse fréquentielle du signal donné par la dégradation d'un roulement de crible.

➤ l'évaluation des prototypes réalisés en vue de leur future industrialisation en carrière (fig. 11). Ce travail n'a pu être fait qu'en collaboration étroite avec les responsables de l'entreprise et de la maintenance sur le site industriel de Cléré-sur-Layon.

La société des carrières de Cléré-sur-Layon et des travaux publics a en effet bien voulu nous accueillir pour tester les différents prototypes réalisés dans le cadre du projet.

Cette carrière exploite un gisement de roches éruptives et granitiques. La production annuelle est de 500 à 600 000 t de matériaux destinés à la route. Elle met en œuvre une chaîne de fabrication (fig. 6) comprenant un poste primaire et deux chaînes de matériaux finis (traitement à sec ou lavage) suivant la destination des matériaux.

Le personnel comprend cinq personnes pour les postes d'administration (directeur, comptable, secrétaire, etc.), treize personnes à la production (surveillants d'installation, laboratoire, conducteurs d'engins) et cinq personnes à l'entretien (électriciens, chaudronniers, mécaniciens).

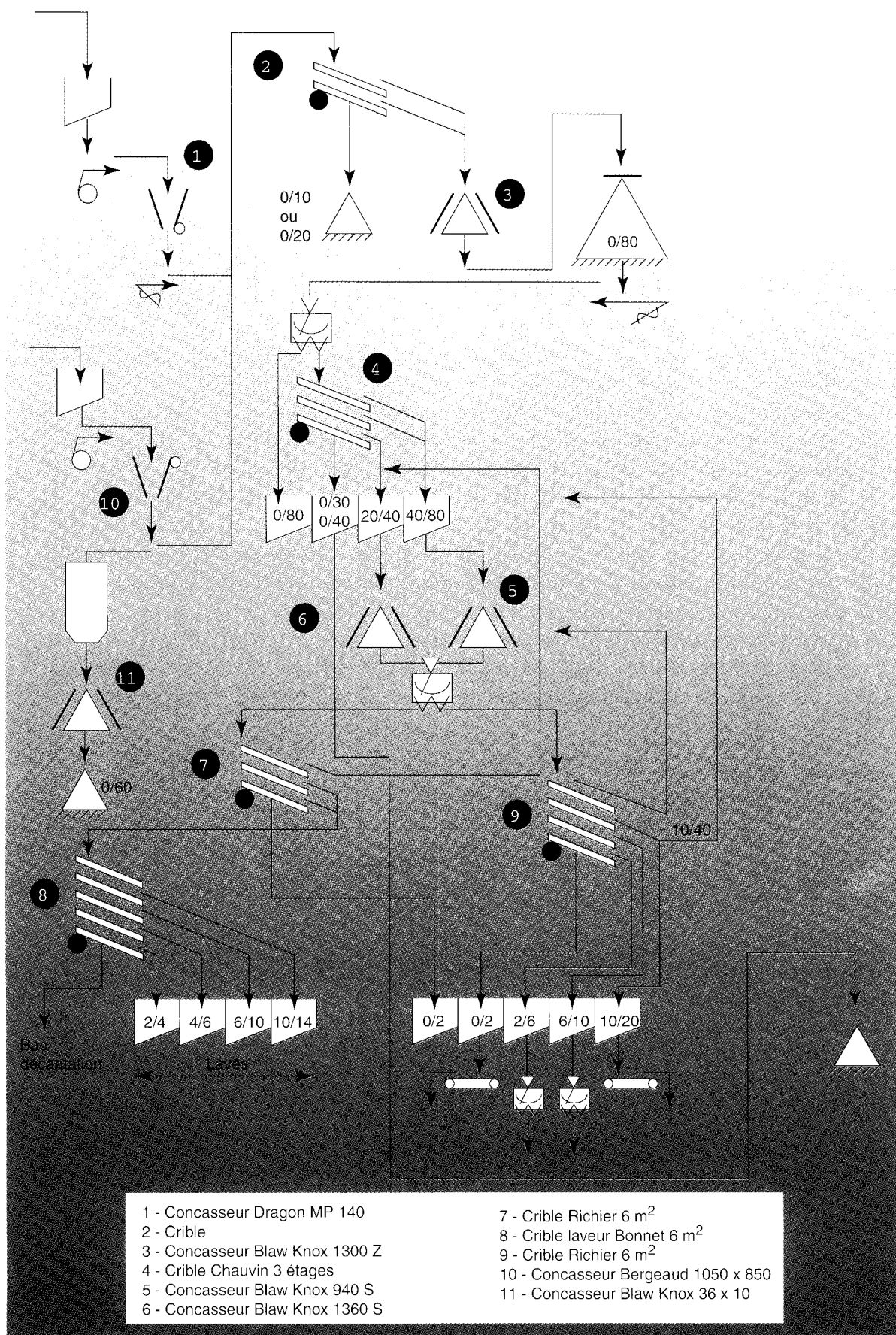


Fig. 11 - Schéma de circulation des matériaux dans la carrière de Cléré-sur-Layon.

Des observations ont alors été faites sur les possibilités d'adaptation des logiciels aux besoins industriels en prenant en compte les caractéristiques des différentes méthodes de gestion de la maintenance rencontrées. Enfin, des propositions ont été faites pour accroître leur facilité d'usage et d'exploitation.

## Conclusion

Une réelle coopération entre les acteurs du projet, les parrains et les entreprises d'accueil ont

permis la réalisation d'un certain nombre d'outils prototypes qui auront certainement un développement industriel (fig. 12).

Il faut maintenant faire passer le résultat des projets européens dans le monde industriel et pour cela tenir compte, dans cette phase de développement, des politiques régionales, nationales ou européennes existantes destinées à soutenir l'innovation. Ce développement nécessite, dans un premier temps, de faire un effort particulier d'information auprès des industriels et des petites et moyennes entreprises (PME) concernées.

Le projet Edmond a été réalisé par le consortium suivant :

- La Société d'Innovations technologiques et industrielles avancées (SITIA) - Nantes
- Le Laboratoire d'Automatique de Nantes (LAN) / Partenaire associé à SITIA - Nantes
- Le Laboratoire de Modélisation et calcul (LMC) / Partenaire associé à SITIA - Grenoble
- Le Centre technique des industries mécaniques (CETIM) / Sous-traitant principal de SITIA - Senlis
- Le Laboratoire central des Ponts et Chaussées (LCPC) / Partenaire principal - Paris
- La Société Géo Assistance / Partenaire associé au LCPC - Saint-Martin-de-Valgagues
- La Société Dragados y Construcciones / Partenaire principal - San Sebastian de Los Reyes (Espagne)
- La Société Tecnos / Partenaire principal - Madrid (Espagne)
- La Société Frias / Partenaire principal - Lisbonne (Portugal)
- TEODORO GOMES ALHO (TGA) / Partenaire principal - Sesimbra (Portugal)
- Le Laboratorio nacional de engenharia civil (LNEC) / Partenaire associé à Frias puis à TGA - Lisbonne (Portugal)
- BERGEAUD / Sponsor - Mâcon
- DRAGON / Sponsor - Fontaine
- NEYRTEC/LORO PARISINI / Sponsor - Pont-de-Claix

Fig. 12 - Les acteurs du projet Edmond.

### ABSTRACT

#### Preventive and predictive maintenance in quarries

J.-M. ARNAUD - P. CHENIN - M. CHERFAOUI - J. COURANT - M. DESCHAMPS - J.-B. DUCASSOU - M. LIZEE - A. MALDONADO

Maintenance is a major component in the operating costs of aggregate production plants. A poor maintenance policy frequently has disastrous repercussions on quality in terms of regularity of production, homogeneity and environmental hazards.

The Laboratoire central des Ponts et Chaussées, in collaboration with a European partnership (the Brite programme) has recently completed a research project dealing with « preventive and predictive maintenance in quarries ». This has led to the production of prototypes of a system which identifies the state of wear of the bearings of crushers and screens, a simulator, and software for computing the reliability of plant. This paper describes different stages of the work and the developed products.