

Le vieillissement pris en compte dans les domaines hors nucléaire / Ageing issues in non-nuclear industrial fields

Président / President : Rémi GUILLET – CCAP France
Christian CREMONA – Laboratoire des Ponts et Chaussées (LCPC) France,
Jean-Marc JAEGER – SETEC TPI France

Sophie MOURLON - We said we had to have a broad view and share different ideas with different people. We have shared with other countries and that was very interesting. Now, what we suggest is to turn to other industrial fields because there are other industrial fields that are facing similar issues and have similar ways, or different ways, to address similar issues. What we are going to do now, what we suggest, is that we look at what is done in the civil engineering business and bridges and major constructions. We will have two presentations. This session is presided over by Mr Rémi Guillet.

Dominique ARNAUD - La prise en compte du vieillissement dans l'exploitation des ouvrages d'art, va commencer par l'exposé de Monsieur Cremona. Monsieur Cremona est ingénieur au laboratoire central des ponts et chaussées, chef de la section durabilité des ouvrages d'art et je pense qu'il va faire un lien entre nos problématiques nucléaires et la problématique des ouvrages d'art.



Christian CREMONA - Thank you very much. It is a very easy presentation because there are so many things to say about bridge engineering, especially maintenance, inspection and assessment. What I am going to talk about today is more about how to assess the performance of existing structures, especially bridges. This is a very important topic because, in France, it is different from other countries: we do not have what we call a 'reassessment code'. We have, of course, a code for constructing new structures, but when you have to reassess bridges, it is sometimes very difficult and uneasy because you have to go back to the initial code, you have to use the actual code, and of course, you are talking about nuclear power plants, but we have to deal sometimes with structures which were

built by the Romans. Consequently, it is very difficult to reassess this type of structure. What I am going to present is, in fact, the steps forward which are expected in performance assessment for existing structures. Before that, because some people are not familiar with civil engineering, I have prepared some slides on the main features of bridges.

First of all, a bridge has to fulfil what we call 'primary functions'. One of the most important primary functions is to assure network continuity. This is a primary function. You also have secondary functions, because you can have cable crossings on the bridge, such as telecommunications cables, sewage systems, electricity, etc, so you have also to fulfil requirements and ensure that there is continuity in this secondary network. The function can be permanent and active. When you have a bridge in the land, it stands alone and ensures 24 hours in 24 hours the functions for which it has been built. You can have passive or active functions on demand. For example, with a moving bridge, you have a continuity of the network only at certain periods of times. It can be permanent but it can be active on demand too. It is a very complex system in fact. At the highest level you have the bridge functions and at the lowest levels you have the bridge components. Those components can lose their function due to degradation, human errors or overloads. In fact, when you have losses at the lowest level, at the component level, you can lose the function at the highest level and you can maybe close the bridge or reduce the loading because you cannot fulfil all the requirements.

What is structural performance? Structural performance has been clearly defined in some European documents: I mention one from 1989, Number 106, which is related to construction products. The performance is, in fact, to check the structural safety and integrity, the serviceability and the durability. Today, we find these requirements in the new Eurocode standards for designing new structures.

Let us have a look at the different performance functions. You have structural safety. Structural safety means you have to check static equilibrium; you need to have an absence of non-reversible and cumulative damages; and when you have non-forecasted loads, you must have satisfactory behaviour.

This means that, in fact, the users' safety is not concerned. You can assume some cumulated damage, non-reversible damage, but user safety is not concerned by the behaviour of the structure.

Service ability is availability but also concerns requirements on deformation and vibration. If I take, for instance, a high-speed track and bridges belonging to the network of high-speed trains, this is one of the most important requirements. In fact, deformation of the bridge results in deformation of the track and, consequently, you have to reduce the speed of the train. It is a very important point when you design and when you have to assess the performance of the bridge on this kind of network.

Durability is a very difficult concept. Even inside my institute you can find several people who have different definitions of durability. In some ways, durability is sustainability of structural safety and serviceability over a period of time. What is new is that the new Eurocode standard introduces something more: it means that you have to maintain sustainability regarding structural safety and serviceability over a period of time with a minimum of maintenance actions. This is very new in a standard for design because, in fact, there is a word which is already included: the word is maintenance. This is very new for bridge engineers.

Consequently, structural performance will help to define what is allowable and what is forbidden. The limit between what is allowable and what is forbidden is described usually by limit states. This is what you can find in standards.

After, you have to define criteria and performance measures. The purpose of the criteria and performance measures are introduced to avoid dangerous states by safety margins. There are three main approaches. One is based on safety coefficients. It is no longer used in Europe but it has been used in previous codes, in Germany, for instance, and in Japan. You have partial safety factor, which is now the standard – it was already the case in the previous French standard - but it is, in fact, defined in the new Eurocode and also defined in United States standards. And you have a step forward, which introduces allowable probabilities of failure. Actually, allowable probabilities of failure are already included in the partial safety factor format. If you take Eurocode – I shall come back to this point later – you see that there is a duality between the

partial safety factor approach and the allowable probabilities of failure approach. Of course, you have to include maintenance action in order to follow the evolution of the criteria and the performance measures over a period of time, in order to determine if you have to perform detailed inspection, repairs or replacement.



Performance evolution: the loss of initial functions can be due to several things. First of all – this is the topic of this symposium – because you have ageing structures and you have to deal with degradations coming from several aspects. You can have human errors and you can have external causes, such as impact, shocks, on piles in bridges. You can have also modification of functions. For instance, the use of the bridge will be different; for instance, you want to have three lanes instead of two, so you are changing how the bridge is used. You can have standard modifications, for instance, the axle load is increased. This is something which has often appeared during the past 20 or 30 years. For instance, this is the case for railway bridges where, in fact, they have to reassess the bridges in order to increase the axle load and to see if they have to replace or reinforce the bridges. Of course, you have lifetime extension. If I take, for example, the Millau Bridge, do you think that in 120 years – which is the design lifetime period – do you think they are going to demolish it and build a new one? I do not think so.

The consequences are numerous. You can have some human factors, if you have a bridge which has been closed to traffic. You can have environmental damage, if you have a failure of the bridge. You can have traffic delays, if this is one of the most important parts, not really because you close the bridge but, for instance, if you reduce the loading on the bridge, maybe some trucks are obliged to take another way to go from one point to another point. Of course, you can have economic factors, for instance if you have a toll on the bridge to reduce the

liability of the bridge, so there is, in fact, a loss of income for the manager.

So in summary, if you want to predict correctly the performance of a bridge, you need to define clearly what performance is. I am sure that this is similar in your industry. It means, in fact, to specify the concept of performance, how to define it and the different limit states. The second point is you have to define clearly what are the measures of performance. So how much is it performing? You can use a deterministic format or a probabilistic format. And a new point, this is quite new, especially in bridge engineering, is to introduce an evaluation of the consequences if, in fact, you have a change in the performance of your structure. It means you have to assess the cost of this change. For this purpose, you have several techniques. One is to make a risk analysis, the second one is to introduce risk-based inspection and the third one is to introduce inspection, maintenance and repair procedures. I will go into more detail on these points later.



As I said, there are three measures of performance. The first one is based on safety factors, or based on allowable stress principles. It means that you take the load and you reduce the strains and you compare the reduced strains with the load. It is a semi-probabilistic format, which is now mainly in all the codes. You use a characteristic value for the load, multiplied by a safety factor which increases this characteristic load and you compare it to a reduced strain. The probabilistic format is to calculate the probability that the loading is over the strains. This is very classical.

When you do a reassessment for an existing structure, you have to deal with some problems. The first one is that these standards are only valid in some contexts. When you have stand out, they are related how to build a good structure and the question is, if for instance, I take my standards and I have a

steel structure and I want to reassess my steel bridge, I am sure it may be a bridge built in the early '20s, and consequently I am going to have some detail which is not very particular detail, and is very different from what I can find in standards. The second point is of course, that partial safety factors for design are including and covering a large set of uncertainties. So when I have a particular bridge, I can reduce the uncertainties by carrying out testing, inspections and testing specimens. The third point is usually, standards are, in fact, covering a lot of uncertainties and there is a large generalisation degree for accounting for those uncertainties. Consequently, when you make a design, if you make a wrong design, and you want to build on the right side of your limit state, it is not very costly. But if you have an existing structure and you are checking your existing structure, and you are on the wrong side, it can cost a lot because it is taken on the maintenance budget and maintenance budgets are usually very low. For a new structure, the cost is mainly the construction cost.

What we are doing is trying to introduce some more advanced techniques in order to reassess structures. While this is not particular to France, and several other countries, the United Kingdom, Germany and all Northern Europe, and even in the United States, have tried to introduce reliability theory in order to reassess existing structures. So it is, in fact, a probabilistic approach. You have to assess probabilities of failure and to compare to another probability of failure in order to take some decisions. The approach is sometimes very difficult because you have to identify all the influencing parameters to make a statistical analysis of the variabilities, to determine probability functions, to calculate probability failures and to compare all that. In fact, you have some limits because sometimes it is very difficult to measure some variables and to get information. The second point is that statistical data is sometimes not available, calculations may be difficult, and one of the most important points is how to select an allowable probability of failure.

This is, in fact, a condition in order to introduce a risk-based assessment approach because a risk-based assessment approach is mainly probabilistic. When you have done your probabilistic analysis, it is possible then to introduce consequences. If you multiply consequences, which are mainly characterised by the cost of the probability of failure, it provides you with an idea of the risk. Be careful, you have to distinguish risk and

hazard. Sometimes there is a misunderstanding between the two concepts. A risk is really something which includes a probability of a hazard, multiplied by the consequences of the cost, if that hazard occurs. And of course, you have honourable risk and honourable probabilities. The expected result from this kind of analysis is to have more efficient assessment and access indicators, to take into account socio-economic aspects by the cost of the consequences to help to define preventative actions, to take into account specificities and maybe to reduce probabilities of failures for existing structures through partial safety factors adapted to existing structures. I have to recall that all the partial safety factors you have today in actual standards can only be used for new structures and not for existing structures. You can also make an optimisation of the inspection to offer better use of inspection results and to test different repair and management strategies and of course, to predict and create priorities. I am going to show some examples for the different points.

The problem in risk assessment is that you have to define what is an allowable risk or what are allowable probabilities of failure. And this is sometimes very difficult. What you can use is fatality rate or societal risk in order to have an idea about what can be chosen as risk, allowable risk, for your activity. This is a general view of the fatality rate, which can be found. It is very different, according to the type of activity. What is important is that you have not confused the approximate death rate with the typical risk of death per year, because it is the activities, not the number of deaths that is important, but also the number of deaths per hour or year of activity. The second point is to define social risk. A lot of work has been done during the Eurocode 1 procedure and process especially to define what are the probabilities of failure allowable for bridge design. This type of table, used for designing dams in the Netherlands, discriminates between voluntary and non-voluntary activities. And if we use this table and compare it with the previous one, it demonstrates that an allowable risk of probability of failure for bridges, per year, is between 10 minus 6 and 2010 minus 6. The driver considers that there is no risk in crossing a bridge so it is a non-voluntary action for him. The maximum boundary is having a car accident on the bridge. So that gives you an idea. And if you look at the probabilities that have been taken into account in Eurocode 1, the basis of design, they are very close.

What I am doing now is showing very quickly what the standards demonstrate regarding the allowable probabilities of failure. The first one is what you can find in Eurocode 1 basis of design. You have to look in the annexe to find all these tables because in the main presentation it is only a summary. What is interesting in Eurocode 1 is that it introduces classes of gravity and, consequently, it is possible to change from one class to another. While this has not been allowed until now for new structures, but everything is made to improve the standard for existing structures. So you can have reduced allowable probability of failures according to the type of structure and the frequency of use and the consequences of failure. If you take the international standard ISO 13822, you have target reliabilities expressed in terms of Beta values. You may not be familiar with Beta values, but it is related to failure. Of course, your serviceability limit state is reversible, non-reversible. If your fatigue details can be inspected or not inspected, you can have very different target reliabilities. It is the same for the standard used in northern Europe, in Scandinavian countries, according to the failure consequences. If your structure is ductile or brittle, you can have several allowable probabilities of failures. If you take NKB – it is more a research code – they make a separation between the consequences of failure and the cost of safety measures in order to reduce the consequences. And you can find several target reliability indexes. If you take the most advanced standard it is, in fact, the Canadian one. With the Canadian standard, you have target reliability which can be different according to the quality of the inspection, to the redundancy of your structure, to the behaviour of your components and the type of traffic crossing the bridge.

If we have a look at the residual and accepted risk in bridges, you will note that if you study the different hazards, 62% of the problems are arising from inappropriate measures. So there is a strong improvement at that point for reducing risk. You have to really use appropriate measures. To summarise failures in bridge structures that you can find, 21% of design mistakes lead to failures. You have 25% due to impact, where cars or trucks impact the bridge. And 16% are due to foundation problems, it is sometimes very difficult to get a good idea of the quality of your foundations. So there are different problems which have the same weight in the failures in bridge structures.

Of course, you have human errors. Sometimes 43% of errors are due to a bad appreciation of loads and structural behaviour. We recently had a problem with a terminal in Roissy Airport, and this was mainly due to those 43%. There are several factors leading to human errors like using new or unusual materials, new or unusual construction processes, new and unusual structures, lack of experience at research and development level. And of course, financial and industrial and political climates, which have sometimes an important consequence relating to human errors. There are different ways to reduce human errors, to have accompanying measures, controlled measures and quality assurance.

I am now going to present what can be a step forward for bridge reassessment. I would like to introduce the concept of bridge geriatrics. It is a field where you have to take into account the full set of actions related to the management of existing structures. That means inspection, auscultation, condition assessment, structural assessment and maintenance. So why? Why must we maintain the performance of bridges? You have to check safety criteria and functionality criteria and serviceability criteria, but also sometimes economical and aesthetic criteria. There are several cases where you can reduce to three criteria, good conditions, bad conditions, but user safety is not concerned, and dangerous. You have two steps in the condition assessment.

It is mainly based on routine inspection or detailed inspection. So you have a view about the state of the bridge. The structural assessment is a bit more difficult because you have to make some recalculations of your bridge. And, as I previously stated, we do not have for instance, in some countries, standards to handle the reassessment of existing structures. You have to do this reassessment when you have increased loads, degradation, repair, modification of use and extended lifetime for very old bridges. In the assessment, you have several stages. The first one is to make a preliminary inspection if it is not made previously as a routine one. The second one is to analyse available documents. This is sometimes very difficult because you can have a lot of documents dispatched and spread over several services. You have to perform detailed inspections, then you must analyse specific data and consequently, make a refined analysis of the limited state and the variables. Of course, eventually you have to make calculations of failure probabilities. From

these data, you can make some decisions regarding repair, loading restrictions, etc. You have to clearly define some advance and assessment indexes. There are four approaches in doing that. The first one is to use characteristic values from standards, partial safety factors from standards, and compare an increased load to reduced strengths. The second one is to use a probabilistic approach based, in fact, on available data and compare the reliability index to the reliability index given in the standards. The third point is what the bridges are doing, to provide some calibrated and new partial safety factors for existing structures and, according to inspection results, to use these reduced or increased partial safety factors. For instance, if, on a bridge, you have only cars, it is not the same as if you have only trucks crossing the bridge. The weight is completely different and the load is completely different. Of course, if you have information regarding the strength of your matter, you can also have better partial safety factors. The fourth approach is to use a probabilistic approach, an updated probabilistic approach. It means that you update your probabilities of failures.

This is a general schematic view of the different ways of using the different assessment indexes, so, of course, you start from the simplest one to the most sophisticated one. The most sophisticated multi-level assessment is a work done in a European research programme between France, Great Britain, Germany, Norway and Spain. This multi-level assessment is now used by the United Kingdom in the assessment of existing bridge structures and is going to be introduced for railway engineering.

When you do reassessment, you need to have principles and procedures applied to existing bridges and procedures which use specific data in the most efficient manner. The gains are to have more performance reassessment, to rationalise assessment inspection procedures, to update performance easily and to compare different solutions. It is very important to have specific data and this is dealing with a structural analysis, loads and strengths. So, in the multi-level approach, as demonstrated previously, you can have a table where, according to the level you are at, a guideline is provided in order to choose an appropriate structural analysis for the assessment level you are performing. In the same way, if you take the loading, you can have some information on dead loads, now it is possible to have some general information regarding the dead loads, chief concrete,

pre-cast concrete, pavement. If you take the Eurocode 1 basis of design, it is written in deterministic terms. But if you go back to the annex, or if you take all the background documents, everything is written in probabilistic terms. That means you can find, in Eurocode, the probabilistic descriptions of traffic loadings that you can use in a probabilistic analysis or in a reassessment when you want to use a risk analysis approach.

Let us look now at strengths, steel reinforcement, steel parts, pre-stress, etc. Regarding the strength of the concrete, we can have some information according to the quality control. For the geometry too, this is a table which you can find in the British standard. And now I am going to show you some applications of the different indexes, based on these kinds of tables, based on specific data and how a probabilistic approach can be used in order to improve your assessment approach. The first index is mainly based on the safety factors and characteristic values in standards. I am going to emphasise and show you some applications for indexes two, three and four. For index two, this is an application on the reinforcement corrosion. We have several reinforced concrete structures to deal with a lot of corrosion problems inside concrete. This leads to corrosion of the different steel parts and reinforcement inside. Basically this is due to two problems. The first one is carbonation. It means that CO_2 is moving inside the concrete, and declining PH levels, leading to an increased probability of corrosion. The second point is an increase of chlorides inside the concrete, and this can cause corrosion at the reinforcement level. These degradation levels can result in several issues. First of all, cracks appear at the concrete surface, then it leads to a loss of load-carrying capacity because you have a loss of reinforcement, a loss of the capacity for the structure to support loading and, of course, you can have a change in the steel properties. Cracking at the concrete surface is not dangerous for the structure; it is dangerous for the user who is beneath the structures. You see, in fact, you can have an evolution in the performance. At the first stage, you have no change because the aggressive agents are going into the concrete. When the aggressive agents reach the reinforcement, you can have a critical amount of aggressive agents and this can lead to a corrosion initiation. You have a loss of serviceability due to cracks, a loss of structural safety because you have a loss of reinforcement and consequently a loss of load-carrying capacity. This is a general view of the different cycles in the performance of

reinforced concrete. So you can have initiation of the corrosion cracking at the concrete cover, then you can have an increase of the cracks and a large increase of the cracks which can lead to scaling, so you can have a loss of concrete. And you can have an important loss of the reinforcement as mentioned earlier. What we did recently was to publish guidelines regarding how to design good concrete when designing new structures. For instance, this table has been used for Millau Bridge in order to define what are the good concrete characteristics when you want to use them for this bridge. But we used this table as a risk for corrosion. And in fact, we made a statistical analysis of the different degradation variables and we made some combinations between the different parameters and at the end it was possible to draw a profile of the degradation. So this will give you an idea of all the degradation profiles of all the different bridges we have selected and analysed. This will also give you an idea of initiation time, mean initiation time, the mean cracking and scaling time. This one is the same figure for a different concrete cover. We also used a probabilistic approach to check for the integrity of the bridge, while the partial safety factors used for designing cables the seismic effects.

The third method has been used to reassess the load-carrying capacity of the Tancarville Bridge, which is the longest suspension bridge in France. The suspension cable was replaced recently and it was important to assess the load-carrying capacity before replacing the suspension cable because the bridge was open to traffic during the maintenance and the replacement works. You can change the partial safety factors, so what I have already mentioned regarding the aggressive agents. The consequences on the performance of concrete structures can be used in order to get some new partial safety factors and to determine through a deterministic approach, the strength of these structures.

Just to conclude regarding fatigue problems, we made a large analysis regarding the fatigue in composite bridges. Composite bridges in France are non-redundant structures. There is a very low degree of redundancy. This kind of design is used in the United States, and is really used in all of Europe. And the question is, if we detect a crack in a welded joint, what is the remaining time before a major problem appears? And we tried to understand the performance. I have to precise that Eurocode 3, dealing with steel and composite structures allows to reduce partial factor from

1.5 to 1, if you are performing good maintenance action, but they did not tell you what the good performance actions are. So if you want to design for 100 years, you can use 1.5 factor. If you want to design for 100 years with a safety factor of one, you have to perform good maintenance actions. So we tried to understand what was this concept of good maintenance actions and to do that, we used a risk-based analysis, as used in offshore engineering. So we have assessed the cost of failures, the cost of inspection, the cost of maintenance and the different parameters for an economical analysis. And when you make an inspection, you can detect a problem or detect nothing. If you detect something, maybe you can do nothing, or you can do a monitoring, or you can do a repair. If I used a two-outcome analysis, if I detect something, I repair. Strictly because it is a non-redundant structure, we arrive at a risk-based inspection, an analysis of the risk and an analysis of what is the most efficient non-destructive technique. The most efficient one is the shortest inspection period and the cheapest technique. We got some results and we found that a rate of between 20 and 30 years is quite a good approach and it corresponds to a rate of 0.5 in the partial safety.

This is a more general approach and you are trying to determine your inspection calendar and inspection planning over 50 years. You can use this type of technique of risk-based inspection approach and this will give you, according to different strategies - if you detect and repair or if you detect you will only repair from a certain degree of degradation - the different results of this kind of optimisation technique. You know that reassessment is only a part of the maintenance programme for bridges. So we need to define good reassessment indexes, how to use them in an efficient way from an economical point of view because you only have limited projects. You have to know how to use inventories and databases in order to provide more reassessment, a more rational performance assessment of your structure. Thank you very much.

Dominique ARNAUD - Merci, Monsieur Cremona. Monsieur Viel va nous donner une seconde présentation d'un sujet hors nucléaire. Monsieur Viel est ingénieur des ponts et chaussées. Il travaille à la SETEC qui est également dans le secteur d'activité des ouvrages d'art.

Grégory VIEL - Je voudrais tout d'abord excuser Monsieur Jaeger qui a eu un empêchement et que je remplace.

Après une introduction, je parlerai de différents aspects de durabilité dans la conception générale des ouvrages d'art, les matériaux, les méthodes de calcul, les études et essais, les dispositions constructives, la qualité de réalisation, la surveillance, l'entretien et l'expertise. Nous pourrions ensuite passer de l'aspect durabilité à l'aspect vieillissement et suivi de ce vieillissement.

En ce qui concerne l'étude de la durabilité, nous allons prendre l'exemple du viaduc de Millau. Loin de nous l'idée de s'arroger la conception du viaduc de Millau à laquelle beaucoup de gens ont participé et SETEC n'a en aucun cas réalisé cette conception. Nous avons participé à certaines phases de cette conception et au suivi des études. Le viaduc de Millau est un bon exemple, parce qu'il est un ouvrage marquant et très important aujourd'hui qui allie du béton et de l'acier. C'est également un ouvrage pour lequel l'objectif de durabilité de base était de 120 ans.



Je vais vous présenter en préambule SETEC TPI qui a pour vocation d'assurer les études, la maîtrise d'œuvre, la conduite d'opérations et l'assistance à maîtrise d'ouvrages pour la réalisation des grandes infrastructures de travaux publics et d'installations à caractère industriel et de leurs équipements. Voici quelques références auxquelles nous avons participé, qui touchent des tunnels, des ouvrages d'art, des équipements sportifs ou culturels de grande hauteur : le tunnel sous la Manche, le pont de l'Europe à Orléans, la tour PV6 à La Défense, l'opéra de Pékin, l'extension du port de Monaco. Nous intervenons donc aussi bien sur des ouvrages neufs que sur des réparations d'ouvrages, mais la durabilité doit être prise en compte dès le début et c'est ce que nous allons voir dans l'exemple de la conception du viaduc de Millau.

Comme vous l'avez vu, il y a énormément de définitions de la durabilité. L'Eurocode donne la définition suivante : une structure durable doit satisfaire aux exigences d'aptitude au service, de résistance, de stabilité pendant la durée de l'utilisation du projet, sans perte significative de fonctionnalités, ni maintenance excessive imprévue. La durabilité est donc l'aptitude à résister, dans le temps, aux différentes agressions et sollicitations de la structure, qu'elles soient physiques, chimiques ou mécaniques. Dans le cas que nous allons étudier plus précisément, nous nous intéresserons aux piles en béton et aux aspects particuliers de durabilité liés au gel, aux sels de déverglaçage, aux réactions chimiques différées que ce soit l'alcali-réaction ou la réaction de gonflement sulfatique interne, ou aux protections des armatures.

Pour ceux qui ne le connaissent pas, le viaduc de Millau est un ouvrage qui a été achevé cette année. C'est un pont à haubans de 2400 mètres de longueur avec huit travées, des portées entre piles principales de plus de 342 mètres. Il a nécessité dix ans d'études avec de nombreuses associations, bureaux d'études et architectes. Le maître d'ouvrage du viaduc de Millau est la compagnie Eiffel et le SETRAM a réalisé les études d'avant-projet. Le groupement qui a été choisi pour la conception est SOGELERG, Michel Virlogeux, ingénieur et Norman Foster, architecte. SETEC TPI a réalisé le contrôle des études d'exécution et le contrôle de la réalisation sur chantier. Les entreprises qui ont construit cet ouvrage sont FHTP et Eiffel.

Le premier aspect de la durabilité est donc la conception. Face à l'objectif de durabilité de 120 ans, il fallait concevoir une structure simple sans joints ni articulations, utiliser des matériaux dans leur domaine d'emploi, l'acier pour le tablier, le béton pour les piles, utiliser un mode de construction favorisant la qualité d'exécution et la durabilité, avec de la préfabrication en usine, et des outils coffrants adaptés. L'objectif était de réduire les coûts d'entretien pour le concessionnaire. Avant de parler des matériaux, le premier aspect qui est très important est la conception. Il fallait imaginer cette durabilité dès la conception.

Le deuxième aspect concerne les matériaux. De l'acier pour le tablier, du béton pour les piles et les culées. Nous avons utilisé des aciers à haute limite élastique pour limiter le poids du tablier et pour avoir une qualité du matériau maximale. Des bétons à haute performance ont été utilisés, quatre formules de béton sur les mêmes matériaux de base de

manière à avoir une meilleure maîtrise de la production et du stockage des matériaux, du B60 sans fumée de silice pour les piles, du B35 avec fumée de silice pour les semelles. Même si cet aspect peut paraître le plus important pour la durabilité, nous verrons que la durabilité des matériaux ne suffit pas à assurer la durabilité de l'ouvrage, puisque nous pouvons grossièrement avoir un béton parfait entre deux fissures parfaites.

Les règles de calcul qui sont actuellement en vigueur ne prennent pas en compte explicitement la durée, même si nous pouvons imaginer qu'elle tourne autour de cinquante ans. Les règles Eurocode traitent clairement le sujet en introduisant les classes d'exposition, les classes structurales, l'enrobage des armatures, et les limitations d'ouverture de fissures. Les règles Eurocode prennent en compte la durabilité, et dans le cas du viaduc de Millau, pour aller plus loin que ces règles Eurocode, le concessionnaire qui cherchait non pas une durée de vie de cinquante ans, qui est une durée minimale en règle Eurocode, mais une durée de vie de 120 ans, a durci les règles, et les critères de conception sur la base des retours d'expériences récents sur des grands ouvrages, mais adaptés à des conditions particulières que sont le pont de Normandie et le pont Vasco de Gama.

Je ferai une parenthèse sur la durabilité du B60. La pile du viaduc de Millau la plus haute est la pile B2 qui fait 245 mètres de haut, avec un fût unique en partie basse et un fût dédoublé en partie supérieure, soit 55 000 m³ de béton B60. Les semelles sont bétonnées à la pompe, et les levées suivantes sont bétonnées à la veine. Lorsque l'on regarde la coupe de la base de cette pile, avec des dimensions de 25,50 mètres sur 17 mètres, si nous faisons le calcul des contraintes, nous voyons que le taux de contraintes est relativement faible en pied de pile, parce que finalement l'utilisation du béton haute performance a plutôt comme but d'avoir des hautes performances en termes de durabilité plutôt que des hautes performances en termes de résistance mécanique. Je vais passer rapidement sur la formulation du béton, elle a utilisé les bases de prescription de la nouvelle norme européenne sur les bétons EN206. La formulation du béton s'est en fait attachée à isoler chacun des risques quand à sa durabilité, que ce soit donc le gel, les sels de déverglaçage, les réactions chimiques différées en isolant chacune de ces réactions et en donnant dans la formulation et la mise en œuvre une réponse précise à chacun de ces facteurs. Nous pourrions détailler, pour chacun

des caractères, la réponse à un problème particulier que ce soit la réaction de gonflement sulfatique interne ou l'alcali-réaction. Donc à base de Clinker pour une meilleure réalisation des aciers, un dosage réduit en ciment pour un dégagement de chaleur minimale pour limiter la réaction de gonflement sulfatique, un ouvrage surclassé en environnement 2B2 gel sévère du fait de la hauteur des piles pour améliorer la durabilité. Pour la mise en oeuvre il a été choisi un fournisseur avec de bonnes références, un temps de malaxage allongé pour améliorer l'homogénéité du béton et un transport classique du béton sans pompage pour garder des techniques de bonne qualité. La précision des armatures est garantie par la bonne teneur en clinker du ciment, un faible taux d'alcalins pour limiter l'alcali-réaction, l'enrobage des armatures de 4 centimètres alors que la norme en demandait trois pour avoir une bonne sécurité vis-à-vis de la carbonatation du béton. Les calculs ont donné une carbonatation du béton de 15 mm sur 120 ans. La faible perméabilité du béton avec un faible rapport d'eau sur ciment améliore sa compacité. Le super plastifiant et le granulage limité améliorent sa maniabilité et enfin l'hydratation basse température avec un dosage en ciment limité et un faible dégagement de chaleur initial permettent de ne pas dépasser la valeur limite qui ferait prendre des risques au niveau du gonflement sulfatique interne. Des études thermiques ont été faites par le laboratoire central des ponts et chaussées avec le logiciel César, et les températures ont été contrôlées par des mesures sur place. Tout cela, pour s'assurer de la durabilité du béton depuis la conception jusqu'à la réalisation.

Le quatrième facteur important dans la prise en compte de la durabilité à la conception est la réalisation d'études et essais. Des essais ont été réalisés pour valider la conception au niveau fiabilité, des études devant être reprises par l'Etat avant la concession. Il s'agit des essais réalisés par la CSTB dans la soufflerie de Nantes, des essais géotechniques, des essais sur les haubans de fatigue et d'étanchéité des différents composants, des essais de fermement statiques et dynamiques lors de la réception et enfin l'installation d'un laboratoire béton sur le site pour un suivi, à chaque coulée, de la qualité du béton.

Un autre facteur concerne les dispositions constructives. L'enrobage des aciers de 40 mm les protège au maximum. Il sera possible d'ajouter de la précontrainte ultérieurement pour intervenir sur l'ouvrage s'il y avait des défauts décelés lors des essais. Une épaisseur plus importante des tôles a été

prévue sur la voie lente : sur la voie rapide les tôles ont 12 mm d'épaisseur, sur la voie lente, où il y a des chargements ponctuels avec les camions notamment, nous avons une épaisseur de tout le plus importante. Ce sont là des dispositions constructives qui permettent d'assurer une bonne conception et une longue vie de l'ouvrage. Pour ce qui est du tablier, il y a une déshumidification de manière à protéger l'intérieur de ce tablier. L'extérieur du tablier étant protégé de la corrosion par une peinture anticorrosion classique.

Les facteurs importants pour assurer la durabilité de l'ouvrage sont les conditions de réalisation, l'utilisation de méthodes bien connues permettant d'avoir une qualité maximale, des coffrages auto-grimpants pour les piles, un assemblage du tablier au sol et 85 % de la main-d'œuvre en usine, avec une préfabrication maximale, un travail en atelier dans les conditions de qualité maximale, et une intervention minimale sur site. Dans le cadre du coffrage des piles, les coffrages sont auto-grimpants à l'extérieur et grimpants à l'intérieur en utilisant la grue. Les coffrages sont équipés d'une jupe textile qui a permis de protéger pendant dix jours le béton après son coulage pour éviter les chocs thermiques et contrôler la prise, ce qui permet de réduire les fissures. Nous avons donc un bon matériau, et en plus nous essayons de le protéger dans sa mise en oeuvre, pour qu'il ne reste pas de fissures dès la construction. La cadence globale est de trois jours pour une avancée de quatre mètres.

Pour l'assemblage du tablier, des tronçons de 170 mètres étaient réalisés. Dès qu'un tronçon était réalisé, l'ensemble des tabliers avançait pour atteindre une pile. En résumé, pour la réalisation du tablier, 85 % de la main-d'œuvre était en usine, le montage était effectué sur site à l'aide de portiques et la réalisation des soudures et de la peinture était faite sous abri de manière à avoir une qualité de réalisation maximale.

Une fois l'ouvrage construit et réalisé, l'aspect important pour assurer sa durabilité est la surveillance et l'entretien. Il y a donc un suivi métrologique qui est en place depuis la construction, qui reste à la réception et qui reste en exploitation : contrôle du comportement des haubans et des capteurs répartis dans la structure de manière à suivre son comportement au cours de sa vie, voire à vérifier les hypothèses de calculs qui ont été utilisées. Ces capteurs sont thermiques, mécaniques et au niveau des déplacements entre autres.

Dernier point qui a été mis en œuvre dans la réalisation du viaduc de Millau, pour assurer sa durabilité : en termes d'expertise et de qualité, le choix du ciment a été fait selon les recommandations du groupe BHP 2000 dans les bétons hautes performances. Un comité d'experts de haut niveau a été rassemblé par les maîtres d'ouvrage depuis la conception jusqu'à la fin de la réalisation pour conseiller et faire un suivi de la réalisation de l'ouvrage. Il y a également eu du contrôle interne et externe des études, un contrôle extérieur réalisé par une maîtrise d'œuvre indépendante SETEC TPI et enfin les audits qualité de l'association française d'assurance qualité tous les six mois.

Après avoir abordé la durabilité, parlons un peu plus précisément du vieillissement. Des essais de fluage ont été réalisés sur le béton de manière à bien appréhender le comportement différé mécanique de ce béton. Des tests de vieillissement de ce béton armé par contrôle destructif ont été menés pour vérifier la carbonatation et la pénétration des chlorures, sur des blocs qui étaient exposés aux mêmes conditions d'environnement que le viaduc. Il a été ensuite prévu sur l'ouvrage des zones de prélèvements où des éprouvettes de béton pourraient être prélevées ultérieurement pour analyser de nouveau le comportement du béton. Il y a donc des zones qui sont un peu plus « luxueuses » que prévu pour étudier éventuellement ultérieurement le vieillissement de l'ouvrage. Et enfin, comme nous l'avons vu, des capteurs sont répartis dans la structure pour garder un monitoring et une surveillance permanente de l'ouvrage.

Les essais réalisés montrent que le fluage était conforme à ce qui avait été pris en compte dans les calculs. La courbe présentée à 90 jours, représente le suivi du vieillissement durant la mise en œuvre.

En conclusion, je résumerai que cet ouvrage est un ouvrage important, avec une conjonction de matériaux qui est une belle manière d'aborder tous les sujets qui pouvaient être évoqués au niveau de la durabilité au moment de la conception et ensuite dans la réalisation. Pour assurer la durabilité, la démarche doit s'intéresser aux aspects suivants : le choix sélectif des matériaux, l'approche spécifique de chaque critère de durabilité, la présentation des retours d'expérience des ouvrages précédents, l'approche qualité des études de la production et du contrôle de celle-ci, et le suivi de la durabilité et du vieillissement des matériaux.

Deux autres exemples d'études sur lesquelles nous avons travaillé, et qui sont des exemples de conception récente dans lesquelles nous avons vu d'autres approches de durabilité ou dans lesquelles nous avons essayé d'intégrer, comme nous l'avons vu, toute cette méthode en amont de l'approche de durabilité. Un exemple concerne des études pour des containers de déchets radioactifs qui ont été réalisées pour le CEA. Il a été par exemple décidé d'utiliser des aciers inox d'une manière à assurer une durabilité dans des conditions très agressives. L'acier inox répondant ici assez bien aux contraintes des containers qui sont en béton armé. Autre exemple, un nouveau pont à La Réunion, que nous avons conçu et qui sera bientôt en cours de réalisation, sur lequel toutes les études ont été faites de manière à prendre en compte dès le départ l'aspect durabilité. Il y a un tablier en acier et des béquilles en béton haute performance. Nous pourrions encore égrener tous les différents aspects du béton et de l'acier qui sont mis en œuvre. Nous nous sommes inspirés des expériences récentes, notamment Millau, pour concevoir cet ouvrage. Sur le tablier métallique, nous avons décidé de mettre des déshumidificateurs mais aussi de mettre de la peinture anticorrosion intérieure de manière à obtenir un degré supérieur de protection.

En conclusion, c'est toujours une question économique, de savoir jusqu'où il faut aller pendant les travaux pour faire gagner sur les interventions ultérieures sur l'ouvrage, pour assurer finalement une maintenance la moins coûteuse possible et une durabilité qui soit la plus longue possible. Merci beaucoup.

Rémi GUILLET - Merci pour ce bel exposé sur un ouvrage particulièrement intéressant avec



un certain nombre de moyens mis en œuvre au niveau de la conception, du choix des matériaux, de la réalisation

qui sont tout à fait précieux et qui complètent bien l'approche que Monsieur Cremona nous faisait sur un parc que l'on imagine assez gigantesque.

Je ne sais pas l'ordre de grandeur du nombre d'ouvrages de ce type évoqués, routiers ou ferroviaires au niveau français.

Christian CREMONA - Cela représente à peu près 30 000 ouvrages au-delà de deux mètres de portée.

Grégory VIEL - Je voudrais ouvrir une parenthèse et dire que mon exposé et celui de Christian Cremona étaient relativement liés dans la mesure où les formations de béton du viaduc de Millau ont été étudiées par le laboratoire central des ponts et chaussées. J'ai seulement présenté des informations, sur lesquelles beaucoup de monde a travaillé et je pense que les deux exposés se recoupaient un peu.

Rémi GUILLET - Ils se recoupaient, mais de façon tout à fait complémentaire, merci de vouloir rendre à César ce qui est à Jules. Nous allons peut-être parler du pont du Gard. À ce sujet, j'aurais une première question qui est cette fameuse durée. Pour Millau, on nous dit clairement 120 ans. Par contre, Monsieur Cremona, vous faites apparaître ailleurs des chiffres avec un point d'interrogation. Vous dites que les ouvrages routiers sont faits pour être utilisables pour une durée de référence de 100 ans en général. Un peu plus loin dans votre exposé, vous donnez une durée de service prévisible qui est a priori de 50 ans et qui apparaît de façon plus claire dans Eurocode. Qu'en est-il exactement et comment se fait-il que nous ayons pu nous passer jusqu'à une date récente de cette notion, de durée de vie. Je posais la question à un jeune ingénieur il y a quelques jours alors que j'étais en train de lire votre papier en me demandant quelles sont les durées d'ouvrages prises en compte actuellement. Il m'a répondu la décennale. Donc, la notion de durabilité ne lui était pas encore arrivée sur le bon neurone. Pouvez-vous nous préciser si cela est dû au fait que nous avons des coefficients de sécurité particulièrement élevés sur les constructions anciennes, que nous pouvons oublier. Ou y a-t-il effectivement une perspective, une date de durée qui était prise par nos anciens il y a 50 ou 100 ans et qui étaient effectivement de 50 ou 10 ans.

Christian CREMONA - Je ferai la réponse en français, ce sera beaucoup plus simple. La question porte sur la notion de durée de vie. Cette notion est très difficile à définir et est très différente d'un pays à un autre. Elle englobe beaucoup de choses sur lesquelles beaucoup de personnes ont des avis divergents. En premier lieu, si nous prenons des ouvrages construits au début du XXe siècle, pour beaucoup, il est vrai que cette notion de durée de vie est tout de même assez floue. Ils construisaient des ouvrages et les géraient au

jour le jour, faisaient une surveillance et voyaient comment ils évoluaient, s'il fallait faire de la réparation, etc. Ce qui était surtout pris en compte étaient les aspects du chargement. C'est pour cette raison que par exemple, si l'on prend certains vieux ponts ferroviaires aux États-Unis, ils ont été dimensionnés pour des machines à vapeur qui sont colossales. Actuellement, de tels ouvrages sont capables de supporter des charges de trafic ferroviaire.



Si nous prenons certains ponts français, construits avant la deuxième guerre mondiale, notamment sur les itinéraires sensibles militaires, ils étaient construits suivant les types de véhicules militaires, des chars d'assaut, par exemple que personne n'a vu passer jusqu'à aujourd'hui. Nous avons donc là aussi des marges de sécurité qui peuvent être très importantes. En termes de chargement, les marges sont grandes. Si je prends le règlement de 1960 pour les ouvrages de petite portée, il est beaucoup plus défavorable que ne l'est le fascicule de 1971 qui est à présent mis en œuvre. L'Eurocode est beaucoup plus sévère, ce qui a notamment obligé les britanniques à revoir tous leurs ponts pour vérifier qu'ils étaient capables de supporter les charges, notamment de poids lourds, données par l'Eurocode. Ce qui n'était pas le cas côté français parce que nous avons des charges de dimensionnement beaucoup plus importantes.

Ce qui pose véritablement problème sont les matériaux. Il faut bien voir qu'en Europe nous avons des ouvrages en acier et en maçonnerie. Je ne parle pas de la maçonnerie gallo-romaine, je parle de la maçonnerie du XIXe et avant. Le patrimoine de maçonnerie ferroviaire en Europe est énorme. Ils représentent 40 % des ouvrages. Et certains pays, comme la Grande-Bretagne, ont besoin de savoir comment les évaluer. Les calculs en maçonnerie sont très difficiles. Nous gérons des ouvrages en fonte, ou en matériaux qui n'existent plus du tout. Nous devons donc avoir une connaissance de ces matériaux et de leur évolution dans le temps. L'aspect

comportement du matériau est actuellement délicat pour apprécier la performance de l'ouvrage. Sans compter les ouvrages construits après la seconde guerre mondiale, très vite et très mal, et qui vivent aujourd'hui en moyenne une cinquantaine d'années. Nous retrouvons donc 100 ans dans l'Eurocode, et il n'est pas très grave que quelques petites formules mathématiques permettent de passer d'une année à une autre. Cinquante ans est une durée de vie moyenne assez réaliste concernant le patrimoine routier. Nous pouvons voir des ouvrages qui sont bien plus anciens et les ouvrages exceptionnels du type pont de Normandie, ou viaduc de Millau dépasseront très certainement leur durée de prévision.

Je pense personnellement qu'il faut distinguer la durée qui est prise en compte dans le règlement et la durée de vie. Lorsque nous disons 120 ans cela veut dire que nous allons faire des calculs sur une période de référence de 120 ans. Cela veut dire que toutes les lois de valeur extrême, les charges routières, les effets du vent, des séismes, etc. seront calculés sur des périodes de retour qui seront raccrochées à cette durée de vie. Ensuite, en termes de durée d'ouvrages, il est déraisonnable de penser à plus de trente ans pour la simple raison que nous travaillons avec des taux d'actualisation en Europe qui sont de l'ordre de 6 %. Donc, faire de l'optimisation technico-économique à plus de trente ans n'a aucun sens. Cela veut dire que l'ouvrage est mort au bout de trente ans. Si vous planifiez de la maintenance sur trente ans, cela veut dire qu'il faut en fait glisser au fur et à mesure, il faut donc la réajuster. Un ouvrage peut également être obsolète, il peut avoir deux voies de circulation, il faudrait le passage de quatre voies de circulation parce que nous sommes dans une zone de trafic très intense. L'ouvrage n'est pas mauvais mais il est obsolète et doit être remplacé. Cette notion de durée de vie doit être véritablement décrite avec attention en fonction de l'ouvrage que nous sommes en train de regarder. Il y a des familles d'ouvrages dont nous savons par exemple que cinquante ans est la durée de vie maximale qui peut être atteinte.

Rémi GUILLET - Nous pourrions en parler longtemps dans l'esprit de notre colloque. Il y a une question importante que vous avez évoquée et qui est celle de l'erreur humaine. Je ne sais pas si nous en avons parlé hier, mais c'est en tout cas un point important. Vous avez évoqué un gros problème récent sur un ouvrage de génie civil à usage aéronautique, que nous avons eu à connaître en France il y a

un peu plus d'un an, et l'effondrement d'une éolienne dans le Nord dont on s'est rendu compte qu'elle avait bénéficié d'une erreur de calcul d'un facteur de 10. Les fondations étaient sous-dimensionnées d'un facteur 10. Elle avait tout de même tenu sept ans. Des kilos-tonnes avaient été assimilées à des tonnes. Pouvez-vous donner un certain nombre de conseils à ce titre ? Cela paraît tellement aberrant de se tromper d'un facteur 10 d'autant qu'il suffit d'un coup d'œil pour voir que cela suffit peut-être pour tenir un gros portique de jardin mais que cette fondation ne doit pas tenir une éolienne de 40 mètres de haut. Avez-vous des conseils ? Nous avons bien sûr la revue des calculs par des organismes, mais avez-vous d'autres outils et y a-t-il eu des précautions particulières dans le cadre de Millau, par exemple, de double vérification des calculs ?

Christian CREMONA - Je vais d'abord laisser répondre mon collègue.

Grégory VIEL - Dans le cas de Millau, il y a eu un contrôle extérieur des études avec un contre-calcul. Un contre-calcul complet a donc été réalisé, et les résultats des calculs, que ce soit des plans de ferrailage ou autres, étaient vérifiés par ailleurs. Chaque étape était vérifiée par un modèle indépendant complet. Les efforts étaient donc comparés par ordre de grandeur. Nous ne nous attendons pas à trouver les mêmes valeurs, bien sûr, mais le contre-calcul faisait que le genre d'erreur dont vous parlez n'était pas possible dans ce cas précis. Pour le dernier ouvrage à La Réunion, le maître d'ouvrage nous a donné la mission VISA de contrôle, avec des contres-calculs, plus les contres calcul sur un certain nombre de points comme la flexibilité générale, la flexion longitudinale, un certain nombre de points importants pour la stabilité de la structure. Ce n'est donc pas généralisé, ce n'est pas nécessaire dans tous les cas mais cela se pratique avec un contre calcul complètement indépendant.

Rémi GUILLET - Une méthode différente est importante.

Grégory VIEL - Un modèle différent sur les contrôles. La mission VISA consiste à regarder toutes les méthodes, hypothèses de calcul, et à donner un avis dessus. Lorsqu'il y a un contrôle interne, un contrôle externe et en contrôle extérieur en mission VISA, cela fait quand même un certain nombre de missions de contrôle même sans aller jusqu'au contre-calcul.

Rémi GUILLET - Cela dépasse largement la vérification d'une feuille de calcul lue en diagonale qui peut effectivement laisser passer une erreur de 10.

Christian CREMONA - Effectivement, pour Millau il y avait un certain nombre d'instances, l'administration avait son comité d'experts, l'entreprise avait son bureau d'études, la SETEC assurait la vérification, ce qui a permis de détecter un certain nombre de choses. Là, nous sommes dans le cadre d'ouvrages très exceptionnels. Dans ce cadre, ce type de vérification est naturel. Pour quelle raison ? Tout simplement parce que les règlements ne sont pas applicables. Si vous prenez l'Eurocode 1, l'Eurocode de calcul, son domaine d'applicabilité est sur des ouvrages jusqu'à 300 mètres de portée. Lorsque nous sommes à Millau, nous ne sommes plus dans la même gamme. Donc à partir du moment où les charges de calcul ne sont plus adaptées, où nous sommes dans des ouvrages sensibles avec effets du vent, où il faut faire des essais en soufflerie etc., vous mettez tout en œuvre pour faire des études qui sont les plus poussées, les plus pertinentes possible. Je vais essayer de ne pas être politiquement correct et je répondrai à votre question en disant qu'à partir du moment où nous mettons les moyens financiers pour mener des études de conception correcte, nous aurons des résultats corrects. Millau est l'arbre qui cache la forêt. Il y a des centaines de petits ouvrages construits par an, par des petits bureaux d'études pour lesquels tout ce qui est mis en œuvre pour Millau n'est certainement pas mis en œuvre au niveau de la construction. Nous sommes également dans un contexte politique en France, que d'autres pays ont connu, où le transfert des compétences aux collectivités locales fait qu'au niveau de l'Etat il y avait encore un certain nombre de compétences que nous ne retrouverons pas au niveau des collectivités locales. Les contre-vérifications seront donc nettement moins poussées. Millau est vraiment le cas exceptionnel. Les petits ouvrages représentent la majorité des cas et lorsque nous construisons une structure comme un simple bâtiment, je pense à l'aérogare de Roissy, nous arrivons à ce type de problème.