

# LA STATION D'ÉPURATION DES GRÉSILLONS : UN EXEMPLE D'UTILISATION DE LA 3D ET DE L'ÉVOLUTION RÉGLEMENTAIRE

## « GRÉSILLONS » USED WATER- TREATMENT CENTER : AN EXAMPLE OF 3D-USE AND OF THE RULES EVOLUTION

---

**Benoît SAUNIER – Solène SAPIN**  
Bouygues Travaux Publics – Bureau d'Etudes

---

### 1. INTRODUCTION

5 ans après avoir livré la station d'épuration des Grésillons (Yvelines, France), Bouygues Travaux Publics vient de réaliser l'extension de l'usine existante, dite Grésillons 2. L'objectif de cette extension est de tripler la capacité de traitement de l'usine existante, pour atteindre les 300 000m<sup>3</sup> d'eau traitée par jour.

Ce projet consiste en la réalisation d'une trentaine de bâtiments qui se font tous en parallèle, dont une partie est enclavée dans l'usine existante.

15 mois de travaux de Génie Civil ont été nécessaires pour couler les quelques 90000m<sup>3</sup> de béton et ainsi ériger l'ensemble des bâtiments. Près de 900 personnes ont été mobilisées sur site, jusqu'à 18 grues à tour ont été installées, et 11000 tonnes de ferrailage ont été mises en œuvre.

### 1. INTRODUCTION

*5 years after delivering the WWTP Grésillons (Yvelines, France), Bouygues Travaux Publics has just completed the expansion of the existing plant, called Grésillons 2. The purpose of this extension is to triple the processing capacity of the existing plant to meet 300 000m<sup>3</sup> of treated water per day.*

*This project involves the construction of thirty buildings, part of which is enclosed in the existing plant.*

*15 months of civil works were needed to pour some 90000m<sup>3</sup> of concrete and erect all the buildings. Nearly 900 people were mobilized on site, up to 18 tower cranes have been installed, and 11,000 tons of steel reinforcement were implemented.*



**Figure 1 : Vue aérienne du chantier.**

Un de ces bâtiments, dénommé le Biostyr, représente à lui seul 38000m<sup>3</sup> de béton. L'étude de ce bâtiment hors-normes (300m de long pour 47m de large) a permis de nous développer autour de 2 axes :

- La mise en place d'une « Maquette Numérique » 3D.
- Une étude comparative entre les règlements à appliquer (BAEL et Fascicule 74) et la nouvelle Réglementation à venir que constitue l'Eurocode 2.

## **2. MISE EN PLACE D'UNE MAQUETTE NUMERIQUE 3D**

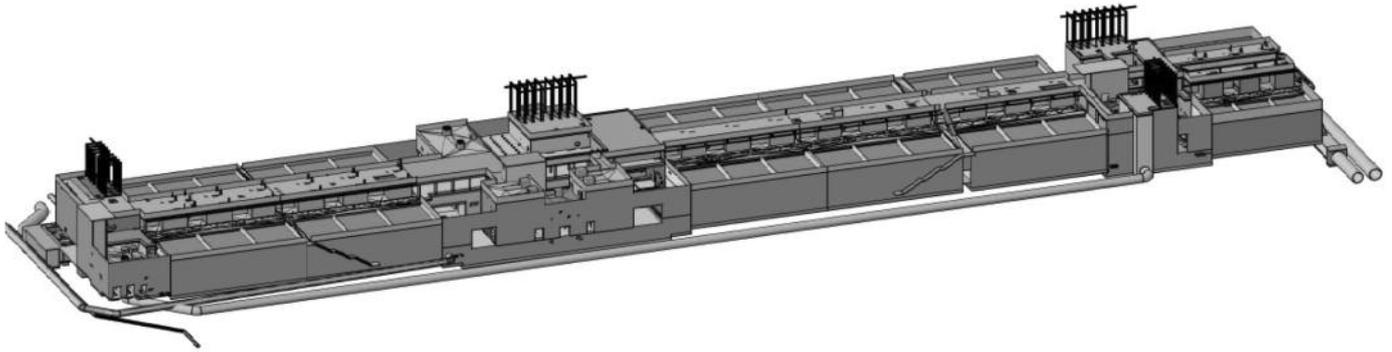
Dès le démarrage de la phase APD, un modèle AUTOCAD 3D du Biostyr a été créé, à partir des « Plans Charges Enveloppes » émis par le Process (Société OTV), plans définissant la fonctionnalité de l'ouvrage. Ce modèle, mis à disposition de l'ensemble de l'équipe Etudes, a permis d'obtenir une représentation géométrique en trois dimensions du bâtiment.

*One of these buildings, called the “Biostyr”, represents on his own 38000m<sup>3</sup> of concrete. The study of this non-standard building (300m long and 47m wide) allowed us to develop around two axes:*

- The establishment of a 3D “Digital Mockup».*
- A comparative study of the french design rules (BAEL and Fascicule74) with the new european “Eurocode 2” rules.*

## **2. IMPLEMENTATION OF A 3D DIGITAL MODEL**

*From the beginning of the Early Detailed Design, a 3D AUTOCAD Model of the Biostyr was created from the “Plans Charges Enveloppes” issued by the Process (Society OTV) defining the functionality of the structure. This model, available to the entire Design team, yielded a three-dimensional geometric representation of the building.*



**Figure 2 : Maquette numérique 3D du Bâtiment Biostyr.**

Grâce à lui, la compréhension de la structure a été grandement facilitée ; en effet, on peut aisément :

- Réaliser des coupes dans n'importe quel plan.
- Imaginer une séquence de construction.
- Enlever des éléments de structure pour mieux visualiser l'intérieur du bâtiment.
- « Parcourir » le bâtiment via une application Autocad.

## Son utilisation pendant la phase « APD »

### Réalisation des plans d'équarrissage :

La réalisation des plans d'équarrissage en phase APD a été légèrement accélérée par l'utilisation du modèle 3D : en faisant une coupe, on sait récupérer le « fond de plan » d'une vue en plan ou d'une coupe du bâtiment.

Malheureusement, la mise en forme du plan (hachures, style de trait, cotation,...) reste à réaliser comme auparavant. A notre connaissance, il n'existe aucun outil permettant d'effectuer la mise en forme « automatiquement ».

Le gain de temps est donc perceptible mais pas flagrant (de l'ordre de 20% au maximum).

Le calcul des quantités béton et leur dispatching par type de structure (radier, dalles, voiles, poteaux,...) ont été largement facilités par l'existence du modèle 3D.

### La passerelle AUTOCAD-ROBOT :

La réalisation du modèle de calcul à partir du modèle AUTOCAD 3D a été testée, mais de nombreuses difficultés sont apparues :

- Le modèle AUTOCAD 3D est constitué d'éléments volumiques ; il faut alors à partir de ces éléments créer un autre modèle qui représente les plans ou axes moyens des différents éléments. Cette transformation n'est pas automatique. Le projeteur et l'ingénieur doivent alors travailler ensemble sur les simplifications à apporter.
- On ne sait pas toujours tout récupérer sur ROBOT simplement, ROBOT étant le logiciel de calculs de structures choisi pour réaliser l'ensemble des études. En effet, à partir du modèle Autocad « simplifié » de la structure, on peut soit importer les contours et recréer les panneaux à partir de ces derniers, soit importer des panneaux à 4 côtés maximum, mais cela suppose un découpage en amont des panneaux.

*Thanks to it, the understanding of the structure has been greatly facilitated, in fact, one can easily:*

*Make drawings from any sectionnal plane.*

*Imagine a sequence of construction.*

*Remove elements of structure to better visualize the interior of the building.*

*“Browse” the building through an Autocad application.*

## Its use during the early detailed design

### Achievement of clipping drawings:

*Achieving the clipping drawings was slightly accelerated by using of the 3D model: by making a cut, you may get the bakground of a plan view or a section of the building.*

*Unfortunately, drawing formating (hatching, line style, quotation, ...) still has to be done as before.*

*To our knowledge, there is no tool to edit automatically the format.*

*The time saved is noticeable but not obvious (in the order of 20% maximum).*

*The calculation of concrete quantities and their dispatching by type of structure (slab, slabs, walls, columns, ...) have been greatly facilitated by the existence of the 3D model.*

### AUTOCAD-ROBOT bridge:

*Making the computational model from the AutoCAD 3D model has been tested, but many problems have emerged:*

- *AUTOCAD 3D model consists of volume elements, so a new model that represents the average planes or axes of the different elements has to be created from these elements. This transformation is not automatic. The designer and the engineer must then work together to simplify the model*
- *We do not always know how to simply transfer everything to ROBOT, as ROBOT is the structure calculations software chosen for all studies. Indeed, from the simplified AUTOCAD model of the structure, you can either import the contours and recreate the panels from it or import panels up to 4 sides, but this requires the cutting up of the panels in advance.*

Ces difficultés existent aussi avec ANSYS ou tout autre logiciel de calcul : il faut créer un modèle 3D propre au calcul (modèle simplifié avec modélisation des plans moyens) que l'on exportera, en plusieurs fois si nécessaire afin de « s'y retrouver ».

#### **Les relations avec l'équipe Travaux :**

Lors des échanges avec l'équipe Travaux, se matérialisant notamment par des fiches « Question-Réponse », le modèle 3D permet d'obtenir facilement des perspectives, des zooms des zones du bâtiment faisant l'objet de questions.

La vérification des interfaces entre 2 plots adjacents, le choix du tracé des joints Waterstop, ont été facilités avec l'utilisation du modèle 3D.

#### **Son utilisation pendant la phase Exécution**

La réalisation des plans de coffrage n'a pas utilisé le modèle 3D ; les projeteurs sont repartis des plans d'équarrissage, et les ont modifiés ou complétés. Le gros handicap du modèle 3D AUTOCAD est qu'il n'y a aucun lien entre la vue 3D et les différentes coupes 2D : si une modification apparaît, il faut modifier à la fois la vue 3D et les vues 2D, d'où la nécessité d'avoir une seule personne qui centralise et réalise les modifications, sinon il y a risque de pertes d'informations.

Des outils comme INVENTOR, permettent, eux, d'avoir un lien entre le 3D et le 2D plus élaboré.

Les plans de ferrailage n'utilisent pas le modèle 3D ; toutefois, l'étude de certains nœuds, de jonctions entre éléments a pu être facilitée par l'existence du modèle 3D.

Malgré tout, le modèle 3D, en y ajoutant la plupart des équipements et notamment les réseaux, a permis de mettre en évidence et de corriger de nombreuses incohérences (croisement de réseaux, réservations non alignées avec les réseaux,...).

Mais l'absence de partage du modèle par les différents intervenants du projet a certainement réduit l'intérêt d'un tel outil de travail.

La mise à jour du modèle 3D a enfin permis de suivre en continu les variations des quantités béton du Biostyr, et à les comparer aux volumes utilisés sur Chantier.

#### **Conclusion sur l'utilisation du Modèle 3D**

L'existence du modèle AUTOCAD 3D a clairement facilité la compréhension du Biostyr ; il a également permis de soulever certaines incohérences, d'expliquer certains conflits, et de se faire comprendre facilement auprès des différents intervenants (Process, Méthodes, Travaux).

La réalisation des plans a mis en évidence le manque concernant le lien entre les images 3D et les coupes 2D ; l'habillage des coupes 2D, étape qui prend le plus de temps, n'est pas rendue plus courte par l'utilisation du modèle.

Reste le sujet de la passerelle entre le dessin et le calcul : cette étape ne peut se faire qu'en créant un modèle propre au calcul, avec un travail collaboratif entre le projeteur et l'ingénieur.

*These problems also exist with ANSYS or every other calculation software: we must create a 3D calculation model (simplified model with modeling medium shots) and then export, in batches if necessary to "make sense".*

#### **Relations with the work team:**

*While exchanging views with the work team by including Question-Answer" sheets " the 3D model can easily obtain perspectives, zoom of areas of the building that are subjects of many questions.*

*The verification of the interfaces between two adjacent blocks and the outline Waterstop joints has been facilitated with the use of the 3D model.*

#### **Its use during the detailed design**

*Formwork drawings weren't made by using the 3D model, and draftsmen set off again from the clipping drawings and have them amended or supplemented. The major disadvantage of AUTOCAD 3D model is that there is no link between the 3D view and different 2D sections: if any change appears, you must change both the 3D and 2D views, so you need a single person who centralizes and modifies the drawings, otherwise there is a risk of losing information. With tools like Inventor you have a more elaborate link between 3D and 2D.*

*Reinforcement drawings aren't drawn by using the 3D model, but the study of some nodes and junctions between elements was facilitated by the existence of the 3D model. Nevertheless, the 3D model, with most of the equipment including networks, helped identifying and correcting many inconsistencies (crossing networks, non-aligned reservations with networks, ...).*

*But the lack of sharing the model by the various stakeholders of the project has certainly reduced the interest of such a tool.*

*The update of the 3D model finally allowed monitoring continuously the changes in the quantities of the Biostyr concrete, and comparing them with the volumes used on Site.*

#### **Conclusion about 3D Model use**

*The existence of AUTOCAD 3D model has clearly facilitated the understanding of the Biostyr and has also raised some inconsistencies, explained some conflicts, and made easier the understanding between the various stakeholders (Process, Methods, Work).*

*Implementing drawings highlighted the lack regarding the connection between the 3D images and 2D sections. The dressing of 2D sections, which is a step that takes most of the time is made shorter by using the model.*

*The link between drawing and calculation remains as a main subject: this step is only made by creating a clean calculation model, with a collaboration between the designer and the engineer.*

Quelques soient les logiciels de calculs et de dessin utilisés, il reste de nombreuses difficultés pour réaliser simplement et rapidement la passerelle entre un modèle 3D et le modèle de calcul.

### **3. COMPARAISON DES RÉGLEMENTS FASCICULE 74-BAEL ET EUROCODE 2**

La mise en place des nouvelles normes de conception que forme l'ensemble des Eurocodes va changer les habitudes de dimensionnement et de vérification des structures béton armé.

Aussi, à travers le projet d'extension de la station d'épuration des Grésillons, il a paru intéressant d'étudier les différences entre le Fascicule 74, règlement qui a été appliqué pour la conception du Biostyr, et le nouveau règlement applicable pour ce type de structures, à savoir l'EUROCODE 2 Partie 3 « Calcul des structures en béton – Silos et réservoirs ».

La comparaison entre ces 2 textes est notamment axée sur l'aspect Maîtrise de la Fissuration, sujet majeur vis-à-vis des ouvrages béton armé où ce matériau doit assurer à lui seul la fonction d'étanchéité de l'ouvrage.

#### **Différence de classification des ouvrages de contenance**

Une classification des ouvrages est proposée dans chacune des 2 normes, mais le critère de classification diffère d'une norme à l'autre.

Pour le Fascicule 74, les ouvrages sont classés selon la manière dont l'étanchéité est assurée :

- Classe A : Ouvrages dont l'étanchéité est assurée par la structure seule.
- Classe B : Ouvrages dont l'étanchéité est assurée par la structure complétée par un revêtement d'imperméabilisation (*enduits ou résines*).
- Classe C : Ouvrages dont l'étanchéité est assurée par un revêtement d'étanchéité, adhérent ou indépendant du support (*membranes, liners*), la structure assurant uniquement une fonction mécanique.
- Classe D : Ouvrages construits à l'aide d'éléments préfabriqués (*joints de construction avec des dispositions particulières*).

Pour l'EC2-3, les ouvrages sont également classés en 4 catégories, mais cette fois en fonction du degré de fuite admissible :

- Classe 0 : Un certain débit de fuite admissible, ou fuite de liquide sans conséquence.
- Classe 1 : Fuites limitées à une faible quantité. Quelques tâches ou plaques d'humidité en surface admises.
- Classe 2 : Fuites minimales. Aspect non altéré par des tâches.
- Classe 3 : Aucune fuite admise.

Ce classement reste qualitatif, aucune valeur de débit admissible n'étant effectivement précisée.

*For whatever design software used, there are still many difficulties to quickly and easily create a link between a 3D model and the computational model.*

### **3. COMPARISON BETWEEN FRENCH RULES "FASCICULE 74-BAEL" AND EUROCODE 2**

*The establishment of new design standards that constitute all the Eurocodes will change design and verification of reinforced concrete structures habits.*

*Also, through the proposed extension of the WWTP Grésillons, it seemed interesting to study the differences between French rules called "Fascicule 74" which has been applied to the design of Biostyr, and the new rules applicable to this type of structures : Eurocode 2 Part 3 "Calculation of concrete structures - silos and tanks."*

*The comparison between these two texts is particularly focused on the cracking control aspect, major subject towards the reinforced concrete structures where this material should in itself perform the water tightness function of the structure.*

#### **Difference of classification for tanks**

*A classification of the structures is available in each of the two standards, but the classification criterion differs from one standard to another.*

*For "Fascicule 74" rule, tanks are classified according to the way of carrying out the water tightness:*

- *Class A: projects where water tightness function is carried out by the structure itself.*
- *Class B: projects where water tightness function is carried out by the structure and a waterproof coating.*
- *Class C: projects which are waterproofed by a sealing coating, adhesive or self-support (membrane liners), the structure provides only a mechanical function.*
- *Class D: Structures built using precast elements (construction joints with special provisions).*

*For EC2-3 work projects are also classified into 4 categories, but this time according to the degree of allowable leakage:*

- *Class 0: an allowable leakage permitted or leakage without any consequence.*
- *Class 1: leaks limited to a small amount. Some stains or plates moisture on surface are allowed.*
- *Class 2: minimum leakage. Appearance unaltered by stains.*
- *Class 3: No leakage allowed.*

*This ranking remains qualitative, no value for allowable flow is actually specified.*

Pour tenter de comparer les 2 règlements, on peut revenir aux valeurs de débits de fuite admissibles données à l'alinéa c) du §XV.1.1.2 du Fascicule 74 (*chapitre Epreuves et réception des ouvrages*) : 10 jours après le premier remplissage, les fuites sont constatées et on évalue un débit de fuite ; il faut, pour déclarer l'ouvrage recevable, que :

- Le débit de fuite ne dépasse pas les 500 cm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> de paroi mouillée/jour pour un ouvrage de classe A (ou de classe D sans revêtement).
- Le débit de fuite ne dépasse pas les 250cm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> de paroi mouillée/jour pour un ouvrage de classe B ou C (ou de classe D avec revêtement).

On pourrait alors proposer le parallèle suivant :

- Ouvrage de classe 1 au sens de l'EC2-3 ⇔ débit de fuite admissible de 500cm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/j.
- Ouvrage de classe 2 au sens de l'EC2-3 ⇔ débit de fuite admissible de 250cm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/j.

Pour des ouvrages « courants », la classe 1 pourrait être retenue.

## Maitrise de la Fissuration

Concernant les ouvrages de contenance, la fissuration doit être effectivement maîtrisée, et des règles spécifiques doivent être suivies. C'est le but des règlements Fascicule 74 (*par rapport aux règles BAEL ou BPEL*), et EC2-3 (*par rapport aux règles EC2 1-1*).

On rappelle que la fissuration s'étudie à l'ELS.

Le Fascicule 74, au §IV.6.2.2.a, limite la contrainte dans les armatures proches de la face « mouillée » des sections partiellement tendues (flexion composée), et pour l'ensemble des armatures des pièces tendues. Une relation entre le diamètre de l'armature et la contrainte admissible est proposée :

$$\sigma_{lim} = \alpha \sqrt{\frac{\eta f_{t28}}{\phi}} + \beta \eta, \text{ avec :}$$

- $\alpha=240$  dans le cas d'ouvrages de classe A. Cette valeur peut être augmentée pour les ouvrages de classes B ou C.
- $\eta$  coefficient de fissuration : =1,60 pour les armatures HA.
- $f_{t28}$  : résistance à la traction du béton : = 0,6+0,06\*f<sub>c28</sub>.
- $\phi$  diamètre de l'armature, en mm.
- $\beta$  : coefficient dépendant de l'agressivité de l'environnement. On retient ici  $\beta=30$ .

Pour les armatures des pièces partiellement tendues et proches de la face non mouillée (face « sèche »), la contrainte est limitée au critère de fissuration préjudiciable ou très préjudiciable du BAEL.

Prenons l'exemple d'un béton C40/50 (f<sub>c28</sub>=40MPa) ; on obtient alors les valeurs suivantes (en MPa) :

Diamètre	8	10	12	14	16	20	25	32
Fasc. 74	200 (*)	200 (*)	200	189	179	166	153	141
BAEL FP	250							
BAEL FTP	200							

(\*) : C'est le critère de fissuration très préjudiciable qui l'emporte.

To compare the two regulations, we can go back to the values of allowable leakage rates mentioned in paragraph c) of § XV.1.1.2 "Fascicule 74" (Chapter Tests and receipt of items): 10 days after the first filling , leaks are detected and a leakage rate is estimated, it is necessary to declare the project acceptable, that:

- The leak rate does not exceed 500cm<sup>3</sup> / m<sup>2</sup> wet / day wall for a class A project (or D without coating).
- The leak rate does not exceed 250cm<sup>3</sup> / m<sup>2</sup> wet / day wall for a class B or C project (or D coated).

We could then propose the following parallel:

- Class 1 project as defined in EC2-3 ⇔ rate allowable 500cm<sup>3</sup> / m<sup>2</sup> / d leak.
- Class 2 project as defined in EC2-3 ⇔ rate allowable 250cm<sup>3</sup> / m<sup>2</sup> / d leak.
- Class 1 could be used for "current" structures.

## Cracking

For tanks cracking must be effectively controlled, and specific rules must be followed. This is the purpose of the rules "Fascicule 74" (compared to BAEL rules or BPEL rules), and EC2-3 (compared to EC2-1-1 rules).

Remember that cracking is studied to satisfy ELS criterion.

"Fascicule 74", at chapter IV.6.2.2.a, limits the reinforcement stress near the "wet" side of the sections partially in tension (combined bending), and for all reinforcement in section in tension. A relationship between the diameter of the bar and the allowable stress is proposed:

$$\sigma_{lim} = \alpha \sqrt{\frac{\eta f_{t28}}{\phi}} + \beta \eta \text{ with :}$$

- $\alpha = 240$ .
- $\eta$  : cracking coefficient: = 1.60 for HA steel.
- $f_{t28}$  : tensile strength of concrete = 0.6+ 0.06\*f<sub>c28</sub>.
- $\phi$  : reinforcement diameter, in mm.
- $\beta$  : coefficient depending on the aggressiveness of the environment. Hence  $\beta = 30$ .

For reinforcement in sections partially tensed and close to the dry side, stress is limited to "detrimental cracking" criteria or "very detrimental cracking" of the BAEL rules.

As the example of a concrete C40/50 (f<sub>c28</sub>= 40MPa) the following values are obtained (in MPa):

Diamètre	8	10	12	14	16	20	25	32
Fasc. 74	200 (*)	200 (*)	200	189	179	166	153	141
BAEL FP	250							
BAEL FTP	200							

(\*) : The "very detrimental cracking" criterion prevails.

Un second critère est à vérifier, qui concerne cette fois la contrainte de traction dans le béton calculée en section homogénéisée non fissurée : il faut s'assurer que cette contrainte, pour les sections entièrement tendues, ou développée sur les faces mouillées, reste inférieure à la quantité  $1,10\theta f_{t28}$ , où  $\theta$  est un coefficient dépendant du torseur (N,M) appliqué ( $\theta \geq 1$ ).

Avec la nouvelle réglementation, il faut distinguer le texte de base de l'EC2-3 du texte de l'Annexe Nationale ; en effet, les critères à vérifier sont nettement différents. Néanmoins, les 2 textes distinguent les fissures traversantes (pièces entièrement tendues) des fissures non traversantes (pièces fléchies). On trouvera dans le tableau ci-dessous la comparaison des critères à vérifier, et ce, pour les 4 classes d'ouvrages définies ci-avant :

Classe d'étanchéité	Texte de base	Annexe Nationale
0	Application de l'EC2 1-1 §7.3.1	Rien de spécifique
1	Fissures traversantes	
	$W_k < w_{k1} (*)$	$W_k < 0,15 \text{ mm}$ et $\sigma_c < f_{cm}$
	Fissures non traversantes	
	Application de l'EC2 1-1 §7.3.1	$W_k < 0,20 \text{ mm}$ et $\sigma_c < 1,5f_{cm}$ pour la face mouillée
2	Fissures traversantes	
	A éviter	$W_k < 0,10 \text{ mm}$ et $\sigma_c < 0,7f_{cm}$
	Fissures non traversantes	
	Rien de spécifique	$W_k < 0,15 \text{ mm}$ et $\sigma_c < f_{cm}$ pour la face mouillée
3	Mise en place d'un revêtement Ouvrages précontraints	Rien de spécifique

(\*) : La valeur de  $w_{k1}$  dépend du rapport hauteur d'eau/épaisseur de la paroi ; on est dans l'intervalle [0,05mm ; 0,2mm]. Par exemple : hauteur d'eau de 10m et voile de 60cm  $\Rightarrow h_D/h = 10/0,60 = 17 \Rightarrow w_{k1} = 0,14 \text{ mm}$ .

Une fissure est réputée non traversante s'il subsiste une épaisseur minimale «  $x_{min}$  » de béton comprimé, déterminée par un calcul béton armé en section fissurée sous le torseur (N,M). La valeur de  $x_{min}$  est donnée par le minimum entre 50mm et  $0,2h$ . Ce critère a été reconduit dans l'Annexe Nationale.

On s'aperçoit que l'Annexe Nationale fournit, pour les classes 1 & 2, des critères différents de ceux proposés par l'EC2-3. Attention, les critères fournis dans le cas des fissures non traversantes sont uniquement valables pour la face « mouillée » ; il faut se reporter aux critères proposés par l'EC2 1-1 pour l'étude de la face tendue sèche (approche identique à celle du Fascicule 74 qui renvoyait au BAEL la justification des armatures situées côté face sèche).

On retrouve également, dans les critères à respecter selon l'Annexe Nationale, un critère concernant la contrainte de traction maximale dans le béton  $\sigma_c$  qui est à comparer avec celui proposé par le Fascicule 74.

*A second criterion has to be checked : concerning the tensile stress calculated with a homogenized uncracked concrete section this stress for sections fully in traction, or developed on wet surfaces, should remain below the amount of  $\theta \cdot 1.10 \cdot f_{t28}$ , where  $\theta$  is a coefficient depending on the torsor (N, M) applied ( $\theta \geq 1$ ).*

*With the new rules, we must distinguish the basic text of the EC2-3 of text from the National Annex; in fact, the criteria to be checked are markedly different. However, the two texts distinguish the crossing cracks (pieces fully in tension) and the no-crossing cracks (bent parts). We can find in the below table a comparison of the criteria to be checked, for the four classes of structures defined above:*

Classe d'étanchéité	Texte de base	Annexe Nationale
0	Application de l'EC2 1-1 §7.3.1	Rien de spécifique
1	Fissures traversantes	
	$W_k < w_{k1} (*)$	$W_k < 0,15 \text{ mm}$ et $\sigma_c < f_{cm}$
	Fissures non traversantes	
	Application de l'EC2 1-1 §7.3.1	$W_k < 0,20 \text{ mm}$ et $\sigma_c < 1,5f_{cm}$ pour la face mouillée
2	Fissures traversantes	
	A éviter	$W_k < 0,10 \text{ mm}$ et $\sigma_c < 0,7f_{cm}$
	Fissures non traversantes	
	Rien de spécifique	$W_k < 0,15 \text{ mm}$ et $\sigma_c < f_{cm}$ pour la face mouillée
3	Mise en place d'un revêtement Ouvrages précontraints	Rien de spécifique

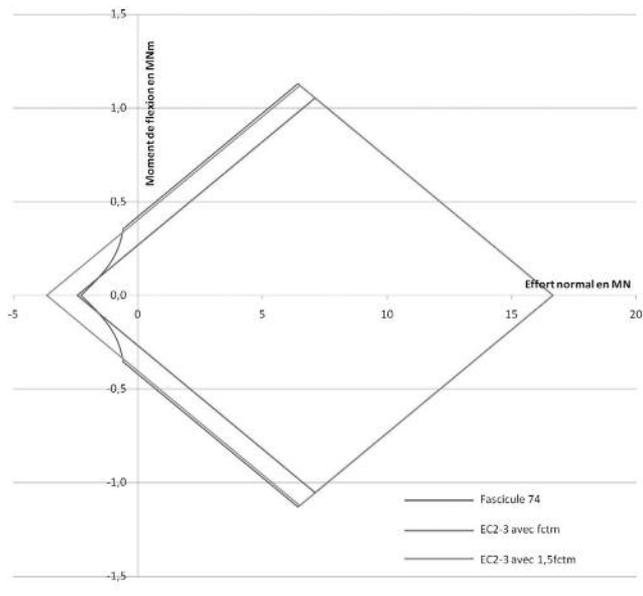
(\*) The value of  $w_{k1}$  depends on the ratio water height / thickness of the wall, contained between 0.05 mm and 0.2mm. For example: water depth of 10m and wall 60cm  $\Rightarrow h_D / h = 10/0,60 = 17 \Rightarrow w_{k1} = 0.14 \text{ mm}$ .

*A crack is deemed non-crossing if subsists a minimum thickness “ $x_{min}$ ” of compressed concrete, determined by calculating the concrete in cracked section under the torsor (N, M). The value of  $x_{min}$  is given by the minimum between 50mm and  $0.2 h$ . This criterion was extended in the National Annex .*

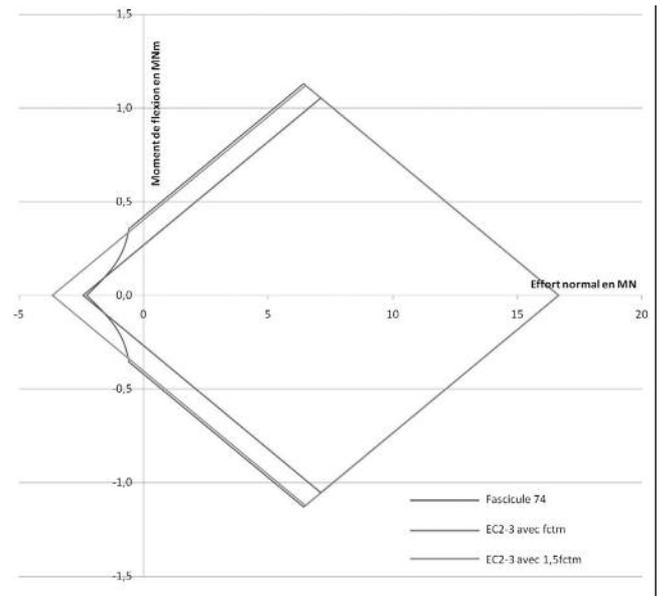
*We see that the National Annex provides for Class 1 & 2 different criteria from those proposed by the EC2-3. Be careful, the criteria provided in the case of non-crossing cracks are only valid for the “wet” side, we must refer to the criteria proposed by the EC2 1-1 to study the dry side (approach similar to “Fascicule 74” which referred to BAEL justification for reinforcement located at dry side).*

*We also find in the criteria to be met by the National Annex a criterion for the maximum tensile stress in the concrete  $\sigma_c$  which is compared with that proposed by the “Fascicule 74”.*

Ci-dessous un exemple pour un béton C40/50, où l'on s'aperçoit que les critères sont relativement proches :



Below is an example for a C40/50 concrete, where it can be seen that the criteria are relatively close:



## L'application au Biostyr

### Classe d'exposition et enrobage des armatures :

La classe d'exposition du Biostyr est la classe XA2, c'est-à-dire « environnement d'agressivité chimique modérée ». Cette donnée d'entrée est fournie dans les pièces écrites du Marché.

Avec cette donnée d'entrée, on sait évaluer l'enrobage à respecter pour les armatures : en suivant les règles EC2 1-1 et l'Annexe Nationale associée, on doit se rapprocher de la classe XD2 pour le calcul de l'enrobage. On obtient ainsi, en considérant à la fois les 3 critères suivants :

- Une durée de vie de l'ouvrage de 50ans.
- L'utilisation d'un béton type C40/50 ( $f_{ck}=40\text{MPa}$ ).
- La notion d'enrobage compact pas forcément vérifié.

une classe structurale S4+0-1+0=S3  $\Rightarrow$  enrobage 35mm.  
Enfin, en considérant une tolérance  $\Delta c_{dev}$  valant 5mm, on obtient comme valeur nominale d'enrobage 40mm, valeur effectivement retenue (valeur identique à la valeur préconisée par la norme P18-011 de Juin 1992 « classification des environnements agressifs »).

### Critères de fissuration :

En considérant que le Biostyr est un ouvrage de classe 1 au sens de la classification Eurocode, les valeurs d'ouverture de fissures à vérifier sont :

- Pour des fissures non traversantes (pièces fléchies) :  
– 0,20mm côté face sèche (application de l'AN de l'EC2 1-1).  
– 0,20mm côté face mouillée (application de l'AN de l'EC2-3, classe 1).
- Pour des fissures traversantes : 0,15mm (application de l'AN de l'EC2-3, classe 1).

Enfin, il faudra s'assurer que la contrainte de traction du béton reste inférieure à :

- $1,5f_{ctm}=1,5*3,5=5,3\text{MPa}$  dans le cas de fissures non traversantes, pour les faces mouillées.

## "Biostyr" application

### Exposure Classes and cover :

*Biostyr exposure Class is XA2 class, ("moderate chemically aggressive environment." ). This input data is provided in the written parts of the Contract.*

*With this input data, we can assess the concrete cover to reinforcement: Following the EC2 Part 1-1 rules and the associated National Annex, it should be closer to the class XD2 for the calculation of the cover. Is thus obtained by considering together the following three criteria:*

- A project lifetime of 50 years.
- The use of a standard concrete C40/50 ( $f_{ck} = 40\text{MPa}$ ).
- The notion of compact coating not necessarily verified.

*structural class S4+0-1+0=S3 P cover 35mm. Finally, by considering a tolerance  $D_{cdev} = 5\text{mm}$ , we obtain a nominal cover of 40mm (identical to the value recommended by the standard P18-011 June 1992 "classification of aggressive environments" ).*

### Cracking criteria:

*By considering that the "Biostyr" is a "Class 1" structure as defined in Eurocode classification, the values of crack width to be checked are:*

- For non-crossing cracks (bent parts):  
– 0.20 mm dry side (application of the National Annex of EC2 1-1).  
– 0.20 mm wet side (application of the National Annex of EC2-3, class 1).
- For crossing-cracks: 0.15 mm (application of the National Annex of EC2-3, class 1).

*Finally, we must ensure that the tensile stress of the concrete is less than:*

- $1,5f_{ctm}=1,5*3,5=5,3\text{MPa}$  for no-crossing cracks in wet side.

- $f_{ctm} = 3,5 \text{MPa}$  dans le cas des fissures traversantes, pour les 2 faces.

#### Résultats de la comparaison entre les 2 règlements :

Les étapes successives de comparaison entre les 2 règlements sont les suivantes :

- Récupération du dimensionnement réalisé selon le Fascicule 74 (torseur et section d'aciers équilibrant ce torseur). On optera alors pour un diamètre d'armatures.
- Évaluation de l'ouverture de fissures selon la méthode directe de l'EC2 1-1, en supposant que la section mise en place est celle calculée selon le Fascicule 74.
- Vérification des critères de l'EC2-3 (ouverture de fissures et contrainte de traction).
- Redimensionnement des sections d'aciers afin de se caler au mieux sur les critères de l'EC2-3.

Cette comparaison, menée en 10 sections représentatives de la structure du Biostyr, permet de faire ressortir 2 idées majeures :

- Le critère sur la contrainte de traction du béton n'est pas dimensionnant. Ceci était déjà le cas avec le Fascicule 74.
- Le critère déterminant est le critère sur l'ouverture de fissure : un dimensionnement avec le Fascicule 74 ne permet pas systématiquement de vérifier une ouverture de fissure inférieure à 0,20mm (à fortiori 0,15mm, cas de la classe d'étanchéité 2).

Là où le dimensionnement des armatures avec le Fascicule 74 permet de vérifier l'ouverture de fissure à satisfaire avec les critères de l'Eurocode, une optimisation des sections d'aciers est possible ; elle est en moyenne de 15%.

Là où le dimensionnement des armatures avec le Fascicule 74 ne permet pas de vérifier l'ouverture de fissure à satisfaire avec les critères de l'Eurocode, il s'agit majoritairement de zones « faiblement » sollicitées (là où la contrainte de traction du béton est largement inférieure à  $f_{ctm}$ ). La fissuration, si elle se produit, ne sera alors pas systématique, mais isolée.

#### Fissuration « isolée » et fissuration « systématique » :

La condition permettant de distinguer la fissuration isolée de la fissuration systématique n'apparaît pas dans le texte de l'Eurocode 2, contrairement à ce qui apparaît dans le code CEB-FIP CM90, au §7.4.3.1 : on retrouve clairement la distinction entre le mécanisme de « single crack » et celui de « stabilized crack ».

Ce détail n'a donc pas été repris lors de la rédaction de l'Eurocode 2, alors que l'on sait que le code CEB-FIP a fortement inspiré l'Eurocode 2.

Dans le code CEB-FIP CM90, la distinction entre les 2 mécanismes de fissuration s'effectue en comparant la valeur de la contrainte des aciers calculée en section fissurée «  $\sigma_s$  » à une valeur «  $\sigma_{s \text{ fiss}}$  » qui dépend uniquement de  $f_{ctm}$  et du ratio d'armatures :

- Si  $\sigma_s < \sigma_{s \text{ fiss}}$ , la fissuration est isolée.
- Si  $\sigma_s > \sigma_{s \text{ fiss}}$ , la fissuration est systématique.

En comparant, sur une section béton armé travaillant en traction pure, les formules d'ouverture de fissures de l'EC2 1-1, du code CEB-FIP CM90 et celle obtenue par un développement théorique, on s'aperçoit que le résultat obtenu

- $f_{ctm} = 3,5 \text{MPa}$  for crossing cracks for both sides.

#### Results of the comparison between the two regulations:

The successive stages of comparison between the two regulations are the following:

- Recovery of the design made according to the “Fascicule 74” (torsor and section steel balancing this torsor). We then opt for a bar diameter.
- Evaluation of the crack width by the “direct method” of EC2 1-1, assuming the implementation steel section that is calculated according to the “Fascicule 74”.
- Verification of the EC2-3 criteria (crack width and tensile stress).
- Re-designing steel sections in order to check the criteria of the EC2-3.

This comparison was conducted in 10 representative sections of the Biostyr structure, brings out two major ideas:

- the tensile stress of the concrete criterion is not dimensioning. This was already the case with “Fascicule 74”.
- The determining factor is the criterion of the crack width: a design with “Fascicule 74” does not systematically guarantee a crack width less than 0.20 mm (0.15 mm all the more for a tightness class 2).

Where the crack width criteria of the Eurocode can be checked with the reinforcement designed according to the “Fascicule 74”, optimization of steel sections is possible, it is 15% on average.

Where the reinforcement designed according to the “Fascicule 74” does not verify the crack width criteria of the Eurocode, it is mostly “low” stress areas (where the tensile stress of concrete is much lower than  $f_{ctm}$ ). Cracking, if it occurs, will be then non systematic, but isolated.

#### “isolated” Cracking and “systematic” cracking:

The condition for distinguishing isolated cracking from systematic cracking does not appear in the text of the Eurocode 2, contrary to what appears in the CEB-FIP code CM90 at § 7.4.3.1: the distinction is clearly found between the mechanism of “single crack” and that of “stabilized crack”.

This detail has not been included in the drafting of Eurocode 2, although we know that the code CEB-FIP strongly inspired the Eurocode 2.

In the model code CEB-FIP CM90, the distinction between the two mechanisms of cracking is done by comparing the value of the reinforcement stress calculated for cracked section “ $\sigma_s$ ” to the value “ $\sigma_{s \text{ fiss}}$ ” which depends only on “ $f_{ctm}$ ” and reinforcement ratio:

- If  $\sigma_s < \sigma_{s \text{ fiss}}$ , it is “single crack”.
- If  $\sigma_s > \sigma_{s \text{ fiss}}$ , it is “stabilized crack”.

By comparing the formula of crack width on a reinforced concrete section working in pure tension cracks widths in EC2 1-1, CEB-FIP code CM90 with that obtained by developing a theoretical formula, we see that the result

en suivant les règles de l'EC2 1-1 est toujours le plus défavorable.

On s'aperçoit que cette surestimation provient de la surestimation du terme  $S_{r,max}$  qui ne varie pas quelque soit l'état de fissuration (fissure isolée ou systématique), ce qui est contradictoire avec le développement théorique du mécanisme de fissuration.

Là où le dimensionnement des armatures avec le Fascicule 74 ne permettait pas de vérifier l'ouverture de fissure à satisfaire avec les critères de l'Eurocode, l'application de la formule de la méthode directe de l'EC2 1-1 conduit à prévoir jusqu'à 40% d'aciers supplémentaires.

Ceci s'explique par le fait que la formule du §7.3.4 de l'EC2 1-1 est incomplète car elle ne traite pas complètement le cas de la fissuration isolée. Dans ce cas, elle surestime l'ouverture de fissure, d'où une sur-consommation d'aciers.

Afin de prendre en compte le phénomène de fissuration isolée, nous proposons l'adaptation suivante de rédaction du texte de l'EC2 pour l'évaluation de l'ouverture de fissure :

- Calcul de  $\sigma_s$  en section fissurée, et comparaison à  $\sigma_{s,fiss}$ .
- Dans le cas de la fissuration systématique, on peut conserver la formule actuelle du §7.3.4 de l'EC2 1-1.
- Dans le cas de la fissuration isolée ( $\sigma_s < \sigma_{s,fiss}$ ), proposer une nouvelle formule pour l'évaluation de  $S_{r,max}$  en s'inspirant du développement théorique.

## CONCLUSION

L'application du nouveau règlement Eurocode 2-3 sur le Biostyr de Grésillons II a permis de mettre en évidence 3 points essentiels :

- La nouvelle classification des ouvrages de contenance (voir §3.1), basée sur le débit de fuite admissible. Malheureusement, aucune valeur de débit n'est mentionnée, seule une classification qualitative est donnée... La distinction entre les classes 1 et 2 n'est pas facile à cerner.
- La différence entre le texte de base de l'EC2-3 et son Annexe Nationale concernant les critères à respecter vis-à-vis de la fissuration (voir §3.2). Ces critères étant fonction de la classe de l'ouvrage, il est important de lever le doute entre les classes 1 et 2.
- La non prise en compte du cas de la fissure isolée dans la formule du §7.3.4 de l'EC2 1-1, contrairement à ce qui est fait dans le code CEB-FIP CM90 (voir §3.3).

Pour finir, on notera que l'EC2-3 traite de la fissuration des pièces béton soumises à des déformations imposées, comme par exemple le retrait à jeune âge (voir le §7.3.5 et les Annexes L & M). Ces articles sont issus des règles BS8007 et CIRIA C660, et permettent de pallier au vide réglementaire français actuel.

obtained following the rules of the EC2 1-1 is always the worst.

We realize that this overestimation comes from the overestimation of the term "Sr,max" that does not vary with the state of cracking (single or stabilized crack), which contradicts the theoretical development of the cracking mechanism.

Where reinforcement designed with the "Fascicule 74" does not allow to check the crack width to meet the criteria of Eurocode, the application of the formula for the direct method leads to provide EC2 1-1 up to 40% additional steel rebars.

This is explained by the fact that the formula of § 7.3.4 of EC2 1-1 is incomplete because it does not fully deal with the case of "single crack". In this case, it overestimates the crack width, from hence, an over-consumption of steel.

To take into account the phenomenon of single cracking, we propose the following adaptation of EC2 to evaluate crack width correctly:

- Calculation "ss" on cracked section and comparison with "ss fiss".
- In the case of stabilized cracking, we can keep the current formula of § 7.3.4 of EC2 1-1.
- In the case of single cracking ("ss" < "ss fiss") proposing a new formula for the evaluation of "Sr,max" inspired from the theoretical development.

## CONCLUSION

The application of the new Eurocode 2-3 rules on "Biostyr" of Grésillons II has highlighted three key points:

- The new classification of tanks (see §3.1), based on the allowable leakage. Unfortunately, not any flow value is mentioned, only a qualitative classification is given ... The distinction between classes 1 and 2 is not easy to define.
- The difference between the basic text of the EC2-3 and its National Annex on the criteria to be met towards cracking (see §3.2). These criteria are based on structures classes, it is important to dispel the doubt between classes 1 and 2.
- Not taking into account the case of the "single crack" in the formula of § 7.3.4 of EC2 1-1, contrary to what is done in the CEB-FIP code CM90 (see §3.3).

Finally, we note that the EC2-3 deals with cracking of concrete elements submitted to imposed deformations, such as the early thermal cracking due to shrinkage (see § 7.3.5 and Appendix L & M). These articles are from BS8007 and CIRIA C660 rules and allow to overcome the gaps in the current french rules.