

# **Banc de fluage d'une plaque d'enrobé sous pression uniforme**

*(Creep of Asphalt Concrete under Uniform Pressure)  
(Bâti mécanique et système d'asservissement)*

---

## **Cahier des Clauses Techniques Particulières**

**Marché n° 2024FOUR013NTE**

# 1 - Présentation du modèle utilisé

## 1-1 La recherche des fonctions

Cette partie du cahier des charges consiste à lister les fonctions qui vont devoir être réalisées. A chaque fonction sont associés quatre éléments descriptifs :

- ***un identifiant***

Il permet de repérer la fonction de manière univoque et correspond de plus au niveau de la fonction.

- ***une description***

Il s'agit d'une courte description de l'objet et du rôle de la fonction.

- ***un commentaire***

Ce commentaire permet de détailler le contexte et les règles d'exécution de la fonction.

- ***un critère d'évaluation***

Cet élément a pour objet de définir comment et avec quels éléments le bon déroulement de la fonction sera évalué.

## 1-2 Les actigrammes

Pour permettre de bien visualiser l'enchaînement et la chronologie des différentes fonctions, des diagrammes sont présentés en fin du document (partie 3).

## 2 - Description générale du banc d'essai

### 2-1 Objet du banc d'essai

Le banc d'essai vise à évaluer le comportement hydromécanique d'une plaque d'enrobé bitumineux étanche soumise à une pression hydraulique uniforme sur sa face supérieure. La plaque d'enrobé bitumineux représente un échantillon du masque amont d'un barrage dont la fonction est d'assurer l'étanchéité de l'ouvrage hydraulique.

Le banc d'essai doit reproduire en laboratoire des conditions hydromécaniques similaires à celles existantes sur le site d'un barrage hydraulique. Les objectifs sont d'évaluer la perméabilité et le comportement caractérisé par l'évolution de la déformation d'une plaque d'enrobé bitumineux qui repose uniquement sur ses extrémités. Cette dernière configuration visant à simuler la présence d'une cavité sous la couche d'enrobé.

**L'échantillon d'enrobé bitumineux sera désigné par le terme « échantillon » dans la suite du document. L'échantillon est produit par l'Université Gustave Eiffel.**

L'échantillon à tester, peut avoir plusieurs dimensions (précisées dans le cahier des charges) et il peut être constitué d'une ou plusieurs couches de matériaux bitumineux, composés de granulats et de bitume :

- Un béton bitumineux étanche (BBE) ;
- Un béton bitumineux drainant (BBDr).

### 2-2 Description générale du banc d'essai

L'échantillon d'enrobé de forme parallélépipédique est préfabriqué aux dimensions voulues dans un laboratoire de l'Université Gustave Eiffel.

Quel que soit l'essai, l'échantillon est fixé à ses extrémités dans le banc d'essai et une pression hydraulique uniforme est appliquée sur sa face supérieure.

Deux types d'essais sont envisagés, chacun ayant une configuration adaptée :

- 1) L'essai de perméabilité : La face inférieure de l'échantillon repose sur un support rigide ajouré de manière à évaluer la perméabilité hydraulique de l'échantillon.

- 2) L'essai de déformation : l'échantillon est libre de se déformer verticalement car il ne repose sur aucun support, cette configuration vise à simuler la présence d'une cavité sous sa face inférieure et ainsi suivre la déformation de l'échantillon par fluage jusqu'à la rupture.

*NB : cet essai de déformation pourra être réalisé sous eau (avec écoulement d'eau à travers l'échantillon) ou à sec (mise en place d'une étanchéité en partie supérieure de l'échantillon pour empêcher les écoulements d'eau traversant). La partie 2-4 détaille le déroulement des essais.*

Le banc d'essai devra comporter :

- un système de fixations aux 4 arêtes verticales de l'échantillon d'enrobé en autorisant la translation horizontale et la rotation selon un axe horizontal de l'échantillon durant l'essai (l'échantillon d'enrobé doit pouvoir se déformer librement sous un chargement appliqué par la pression hydraulique).
- un système de chargement avec une pression hydraulique uniformément répartie sur la face supérieure de l'échantillon ;
- un support rigide sous l'échantillon pendant l'essai de perméabilité (support perforé amovible) ;
- un système de translation verticale du support rigide sous l'échantillon (pour le passage entre les deux types d'essai et reproduire ainsi l'apparition d'une cavité avant l'essai de fluage) ;
- un tamis de récupération des débris d'enrobé après rupture par fluage ;
- Un bac amovible et une balance dessous l'échantillon pour suivre la quantité d'eau traversant l'échantillon d'enrobé ;
- Des capteurs permettant de mesurer les déplacements en partie centrale de l'échantillon (à savoir la mesure de la flèche) ; les angles de rotation des appuis aux extrémités, la température ;
- Des caméras et des appareils photos pour enregistrer la déformabilité de l'échantillon et le processus de fissuration de l'échantillon durant l'essai de fluage ;
- Le raccordement des capteurs et l'enregistrement des données collectées à un ordinateur dédié ;
- Un système d'arrêt automatique de l'essai dès la détection d'une rupture de l'échantillon.

Le système devra enregistrer en entrée :

- les informations entrées par l'opérateur sur la pression de chargement hydraulique ;
- les valeurs issues des chaînes de mesure pendant l'essai : température, rotation aux extrémités et flèche au milieu de l'échantillon, mesure de la masse d'eau récupérée dans le bac amovible en-dessous de l'échantillon ;
- la quantité d'eau injectée dans le système d'asservissement pendant l'essai.

En fin de chaîne, il sera restitué :

- un fichier de caractéristiques générales de l'essai ;
- un fichier des paramètres d'entrée ;

- un fichier de résultats (format .csv et .xls) ;
- des fichiers images et vidéo

### **2-3 Description des modules fonctionnels**

Le banc d'essai a été décomposé en trois modules : deux modules associés (mécanique et hydraulique) ; un module de collecte, enregistrement et traitement des données.

A : Module mécanique

- A1- Echantillons d'enrobé à tester
- A2 – Système de fixation des échantillons d'enrobé
- A3 – Supports sous l'échantillon d'enrobé
- A4 – Bâti destiné au chargement hydraulique

B : Module hydraulique

- B1 – Système hydraulique de mise en pression de l'échantillon d'enrobé

C : Collecte, enregistrement et traitement des données

Le tableau suivant synthétise toutes les fonctions qui sont détaillées ci-après dans le cahier des charges

Module	Sous-ensemble	Fonctions
<i>Module A – Module mécanique</i>		
A	A1 – Echantillons d'enrobé à tester	A1.1 – Pouvoir réaliser l'essai sur des plaques d'enrobés
		A1.2 – Garantir l'étanchéité de l'échantillon en périphérie
	A 2 – Système de fixation des échantillons d'enrobé	A2.1 - Permettre la rotation et la translation des appuis aux extrémités
		A2.2 – Disposer d'un porte-échantillon réglable en hauteur et longueur
		A2.3 – Disposer de pièces intermédiaires démontables entre les appuis fixes du bâti et l'échantillon d'enrobé

	A3 – Supports sous l'échantillon d'enrobé	A3.1 – Disposer de supports rigides amovibles perforés (type grille) avec et sans orifice en partie centrale
		A3.2 – Disposer d'un système mécanique pour déplacer le support amovible (A3.1) perforé pendant l'essai
		A3.3 – Eviter tout écoulement d'eau au niveau du contact support / échantillon
	A4 – Bâti destiné au chargement hydraulique	A4.1 – Permettre le chargement hydraulique de l'échantillon d'enrobé
		A4.2 – S'assurer que l'ensemble du bâti résiste aux poids de l'échantillon d'enrobé et aux niveaux de pressions hydrauliques
		A4.3 – Visualiser la déformation de l'échantillon d'enrobé au cours de l'essai
		A4.4 – S'assurer de l'étanchéité du banc d'essai
		A4.5 – Disposer d'un bâti mobile
		A4.6 – Disposer d'un bâti démontable
		A4.7 – Disposer d'un bâti avec des dimensions compatibles avec celles de la chambre climatique disponible au laboratoire MIT de l'Université Gustave Eiffel
<b>Module B – Module hydraulique</b>		
B	B1 – Système hydraulique de mise en pression de l'échantillon d'enrobé	B1.1 – Disposer d'un système d'asservissement de la pression de chargement pendant l'essai
		B1.2 – Disposer d'un tamis et d'un bac de récupération de l'eau
		B1.3 – Disposer d'un réservoir pour l'alimentation en eau
<b>Module C – Collecte, enregistrement et traitement des données</b>		
C	C1 – Collecte des données horodatées	C1.1 – Suivre l'évolution de la flèche de l'échantillon d'enrobé
		C1.2 – Suivre l'évolution de la rotation des appuis
		C1.3 – suivre l'évolution de la quantité d'eau à l'entrée du système de saturation
		C1.4 – Suivre l'évolution de la quantité d'eau dans le bac
		C1.5 – Suivre l'évolution de la quantité de matériaux dans le tamis récupérateur
		C1..6 – Suivre l'évolution de la température dans le bâti
		C1.7 – Enregistrer la durée de l'essai
	C2 – Traitement et édition des données	C2.1 – Calculer la perméabilité de l'échantillon d'enrobé
		C2.2 – Enregistrer les valeurs calculées
		C2.3 – Visualiser les courbes de résultats

	C3 – Enregistrement des évènements	C3.1 – Enregistrer l'ensemble des informations liées au fonctionnement du banc d'essai
		C3.2 – Enregistrer l'ensemble des informations liées au déroulement de l'essai
	C4 – Enregistrement de l'essai	C4.1 – Enregistrer l'essai avec des dispositifs de caméras et appareils photos (en mode time lapse)
		C4.2 – disposer d'éclairage annulaire autour des appareils photos
	C5 – Pilotage de l'essai	C5.1 – Commander l'essai et accéder aux données

## **2-4 Phasage des essais de perméabilité et de déformation**

Les essais seront réalisés sur un échantillon de forme carrée (côtés de longueur soit 380 mm ou 500 mm).  
L'essai de déformation sera réalisé à sec ou sous eau.

### **a) Essais de perméabilité et de déformation (sous eau)**

Pour la réalisation de l'essai sous eau, il y aura 6 phases qui sont décrites dans le tableau ci-après :

*Tableau 1 : phasage de l'essai en eau*

<b>N° phase</b>	<b>Description</b>
Phase E0 : fixation de l'échantillon d'enrobé aux pièces intermédiaires démontables du banc d'essai	L'échantillon d'enrobé est collé à sa périphérie aux pièces intermédiaires démontables à l'extérieur du banc d'essai (opération réalisée dans un banc de collage, qui ne fait pas l'objet du présent cahier des charges)
Phase E1 : essai perméabilité à T0	<ul style="list-style-type: none"> <li>- l'échantillon d'enrobé est fixé à ses extrémités dans le banc d'essai ;</li> <li>- l'échantillon d'enrobé repose sur un support rigide perforé ;</li> <li>- une pression hydraulique uniforme est appliquée sur la surface supérieure de l'échantillon d'enrobé ;</li> <li>- après atteinte du régime permanent, un essai de perméabilité T0 est réalisé ;</li> <li>- l'eau collectée sous l'échantillon d'enrobé est pesée et évacuée à la fin de l'essai.</li> </ul>
Phase E2 : déplacement du support rigide perforé	- après l'essai de perméabilité, le support rigide perforé est déplacé verticalement pour laisser l'échantillon d'enrobé libre de se déformer verticalement (fluage)
Phase E3 : essai de déformation	<ul style="list-style-type: none"> <li>- l'échantillon d'enrobé est fixé à ses extrémités et ne repose sur aucun support</li> <li>- Une pression hydraulique uniforme est appliquée sur sa face supérieure pendant toute la durée de l'essai.</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- les déformations de l'échantillon d'enrobé sont mesurées ainsi que les débits d'eau en entrée et sortie.</li> <li>--L'essai peut aller jusqu'à la rupture de l'échantillon ou s'arrêter avant avec l'intervention d'un opérateur.</li> <li>-L'eau collectée sous l'échantillon d'enrobé est pesée et évacuée.</li> </ul>
Phase E4 : translation verticale du support perforé (cas où l'essai de déformation est arrêté avant la rupture de l'échantillon)	Dans le cas où l'essai de déformation est arrêté avant la rupture de l'échantillon d'enrobé, le support rigide perforé est repositionné sous l'échantillon d'enrobé pour être mis en contact avec sa face inférieure.
Phase E5 : essai perméabilité à $T_f$ (cas où l'essai de déformation est arrêté avant la rupture de l'échantillon)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- à la fin de l'essai de déformation (correspondant au temps <math>T_f</math> c'est-à-dire <math>T</math> final), le support rigide perforé est repositionné sous l'échantillon d'enrobé pour être mis en contact avec la face inférieure de l'échantillon d'enrobé.</li> <li>-une pression hydraulique uniforme est appliquée sur la surface supérieure de l'échantillon d'enrobé ;</li> <li>-après atteinte du régime permanent, un essai de perméabilité <math>T_f</math> est réalisé ;</li> <li>-l'eau collectée sous l'échantillon d'enrobé est pesée et évacuée à la fin de l'essai.</li> </ul>

#### b) Essai de déformation à sec

Le banc d'essai pourra être utilisé pour un essai à sec, c'est-à-dire sans écoulement d'eau dans l'échantillon. Des systèmes d'étanchéité (membrane par exemple) pourront être collées sur la face supérieure de l'échantillon d'enrobé pour éviter tout écoulement d'eau dans l'échantillon. Pour l'essai à sec, il y aura 1 phase décrite dans le tableau ci-après

N° phase	Description
Phase S1 : essai de déformation	<ul style="list-style-type: none"> <li>-l'échantillon d'enrobé est fixé à ses extrémités et ne repose sur aucun support.</li> <li>-Une pression hydraulique uniforme est appliquée sur sa surface supérieure pendant toute la durée de l'essai.</li> <li>- <b>Aucun écoulement d'eau ne doit avoir lieu dans l'échantillon d'enrobé.</b></li> <li>- les déplacements en partie centrale de l'échantillon d'enrobé (la flèche) et les rotations aux extrémités sont mesurées et enregistrées.</li> <li>- L'essai pourra aller jusqu'à la rupture de l'échantillon ou s'arrêter avant avec l'intervention d'un opérateur.</li> </ul>



## **2-5 –Plans de Conception**

**L'Université Gustave Eiffel a réalisé les études de conception du bâti mécanique. Les plans sont fournis avec le cahier des charges.**

L'ensemble des données à collecter, enregistrer et traiter figurent dans le présent cahier des charges. Les matériels de mesures et d'acquisition n'ont pas été implantés sur les plans. L'entreprise plantera sur les plans les capteurs, appareils photos, caméras,... en fonction des dimensions des matériels et de leurs caractéristiques techniques.

Enfin, pour prendre en compte les dispositions constructives d'installation du système d'étanchéité (membrane/soufflet) en périphérie de la face supérieure de l'échantillon d'enrobé (fonction A3.3), il sera possible d'apporter des modifications mineures sur les plans comme les fixations des accessoires sur la structure.

# A1

## Echantillons d'enrobé à tester

Ce regroupement fonctionnel comporte 2 fonctions identifiées A1.1 et A1.2.

### A1.1 Pouvoir réaliser l'essai sur des plaques d'enrobé

**Commentaires :** Les échantillons d'enrobé sont fournis par l'Université Gustave Eiffel. Les échantillons seront des plaques fabriquées en laboratoire ou provenant d'un barrage hydraulique. Il sera étudié des plaques sans défaut apparent et des plaques avec défaut (déformations, fissurations, trait de scie en surface pour reproduire la présence d'un défaut ou d'un dommage sur des matériaux neufs). Les essais seront réalisés sur des plaques carrées de dimensions pouvant varier de 380 mm \* 380 mm à 500 mm \* 500 mm. La tolérance appliquée sur les dimensions des plaques est de +/- 2 mm.

Il pourra y avoir 3 types d'échantillons à tester :

- Un monocouche BBE (Béton Bitumineux Etanche) avec une épaisseur variable entre 40 et 100 mm ;
- Un drainant BBDr (Béton Bitumineux Drainant) monocouche avec une épaisseur de 100 mm ;
- Un bicouche BBE + BBDr avec une épaisseur maximale de 200 mm

La masse volumique réelle (MVRe) des matériaux utilisés est indiquée comme suit :

- La MVRe l'enrobé étanche (BBE) est égale à 2,4 Mg/ m3.
- La MVRe de l'enrobé drainant (BBDr) est égale à 2,6 Mg/ m3.

Suivant le poids des matériaux, la mise en place des échantillons dans le banc d'essai sera réalisée manuellement ou avec des appareils de levage.

**Critère d'évaluation :** pour chaque configuration à tester, les dimensions seront renseignées par l'opérateur dans le système :

- Epaisseur : e (numérique) ;
- Longueur : L (numérique) ;
- Largeur : l (numérique) ;

L'unité d'affichage des valeurs est  $10^{-3}$  m. L'unité d'affichage est le « mm ».

#### **A1.2 Garantir l'étanchéité de l'échantillon en périphérie**

**Commentaires :**

Pendant « l'essai sous eau », l'eau pourra migrer à travers l'épaisseur de l'échantillon du haut vers le bas. Toute circulation d'eau en périphérie de l'échantillon devra être évitée. Un dispositif est prévu sur le pourtour de l'échantillon pour garantir l'étanchéité (cf fonction A3.3).

**Critère d'évaluation :** Visuel. Absence de fuites aux extrémités des échantillons pendant l'essai.

# A2

## Système de fixation des échantillons d'enrobés.

Ce regroupement fonctionnel comporte 3 fonctions identifiées A2.1 ; A2.2 et A2.3

### A2.1 Permettre la rotation et la translation des appuis aux extrémités

**Commentaires :**

Au cours de la déformation, le système de fixation devra accompagner les mouvements de l'échantillon d'enrobé.

Les appuis devront être amovibles afin de faciliter les opérations de montage et démontage d'un ensemble « appui + échantillon »

**Critère d'évaluation :** un visuel de l'essai et la mesure des angles de rotation des appuis.

### A2.2 Disposer d'un porte-échantillon réglable en hauteur

**Commentaires :**

Un porte-échantillon permettra de travailler avec des épaisseurs d'échantillon variant entre 40 mm et 200 mm. Dans une première phase d'essai, Il est prévu de réaliser les essais sur un monocouche BBE (épaisseur comprise entre 40 et 100 mm). Par la suite et selon les résultats obtenus, il sera réalisé des essais sur un enrobé drainant BBDr et/ou un bicouche BBE+BBDr. En résumé, Il faudra que le porte-échantillon puisse recevoir plusieurs épaisseurs d'échantillon et supporter les masses de ceux-ci :

- Un monocouche BBE avec une épaisseur variable entre 40 et 100 mm (masse comprise entre 10 et 60 kg\*);
- Un drainant BBDr monocouche avec une épaisseur de 100 mm (masse comprise entre 20 et 45 kg\*);
- Un bicouche BBE + BBDr avec une épaisseur max de 200 mm (masse comprise entre 60 et 110 kg\*).

\* Hors masse des pièces de fixation

**Critère d'évaluation :** mesure de l'épaisseur des plaques par un opérateur avant l'essai.

Plusieurs porte-échantillons seront fournis avec le banc d'essai.

Ils devront permettre de travailler avec les échantillons suivants :

- Echantillon carré d'épaisseur 40 mm et longueur 380 mm ;
- Echantillon carré d'épaisseur 80 mm et longueur 380 mm ;
- Echantillon carré d'épaisseur 80 mm et longueur 500 mm ;
- Echantillon carré d'épaisseur 200 mm et longueur 380 mm ;
- Echantillon carré d'épaisseur 200 mm et longueur 500 mm.

### **A2.3 Disposer de pièces intermédiaires démontables entre les appuis fixes du bâti et l'échantillon d'enrobé**

***Commentaires :***

Les échantillons d'enrobé bitumineux ne seront pas collés aux appuis fixes du bâti. Des pièces intermédiaires entre les appuis fixes et l'échantillon d'enrobé bitumineux sont à prévoir aux 4 coins de l'échantillon d'enrobé. En effet, lors de l'opération de décollement, il y a un risque de détérioration des appuis fixes du bâti si l'échantillon est collé directement. Disposer de pièces intermédiaires facilitera les opérations de montage et de démontage. L'étanchéité devra être assurée entre ces pièces intermédiaires et le bâti.

*NB : L'opération de collage des pièces sera réalisée en dehors du banc d'essai par l'Université Gustave Eiffel avec un dispositif distinct du banc d'essai (banc de collage qui ne fait pas l'objet du présent cahier des charges).*

***Critère d'évaluation:*** -

# A3

## Supports sous l'échantillon d'enrobé

Ce regroupement fonctionnel comporte 3 fonctions identifiées A3.1 ; A3.2 et A3.3.

### A3.1 Disposer de supports rigides amovibles perforés (type grille) avec et sans orifice en partie centrale

#### **Commentaires :**

L'essai est réalisé pour étudier :

- La perméabilité d'un échantillon soumis à une pression hydraulique sur la face supérieure de l'enrobé et reposant sur un support amovible perforé ;
- La déformation d'un échantillon d'enrobé soumis à une pression hydraulique en surface et reposant sur une cavité. Dans ce cas, deux configurations d'essais seront testées :
  - échantillon reposant sur un support rigide amovible perforé avec un orifice au centre ;
  - échantillon uniquement fixé en périphérie et reposant dans le vide (absence de support).

**Critère d'évaluation :** Le support amovible perforé reposant sous l'échantillon devra être amovible. Il pourra être dégagé par une translation verticale pendant l'essai pour simuler la formation d'une cavité sous l'échantillon d'enrobé. A chaque étape de l'essai correspondant à un niveau de fluage de l'échantillon, le support ajouré sera repositionné sous l'échantillon d'enrobé afin de réaliser un essai de perméabilité. Le support amovible devra pouvoir être facilement démontable par un opérateur.

Trois types de support amovibles (aux dimensions 380 mm \*380 mm) seront à fournir :

- Support perforé sans orifice ;
- Support perforé avec un orifice en sa partie centrale (trou de diamètre 200 mm) ;
- Support perforé avec un orifice en sa partie centrale (trou de diamètre 300 mm).

Deux types de support amovibles (aux dimensions 500 mm \* 500 mm) seront à fournir :

- Support perforé sans orifice ;
- Support perforé avec un orifice en sa partie centrale (trou de diamètre 400 mm).

Lorsque les essais seront réalisés sur des échantillons d'épaisseur 40, 80 mm, des rehausses seront à prévoir sous les supports amovibles.

### **A3.2 Disposer d'un système mécanique pour déplacer le support amovible perforé (A3.1) pendant l'essai**

#### ***Commentaires:***

Le bâti devra être équipé d'un système mécanique permettant le déplacement du support amovible. Il s'agira d'un système manuel réglable à l'extérieur du bâti par un opérateur avant l'essai et/ou en cours d'essai. La partie du banc d'essai à l'intérieur du bâti devra pouvoir résister à des sollicitations hydrauliques répétées. Il s'agit de résister aux efforts et à l'effet de l'eau (corrosion).

***Critère d'évaluation :*** Le support amovible perforé devra pouvoir être déplacé sur une hauteur de 300 mm.

### **A3.3 Eviter tout écoulement d'eau au niveau du contact support / échantillon**

#### ***Commentaires :***

Pendant les essais en eau, le banc d'essai devra être étanche et ne permettre aucun écoulement d'eau entre l'échantillon d'enrobé et les fixations (appuis fixes du bâti et pièces intermédiaires). L'eau qui sera prélevée en partie inférieure de l'échantillon devra provenir exclusivement de la migration de l'eau à travers l'épaisseur de l'échantillon d'enrobé (les fuites apporteraient un biais de mesure pour estimer la perméabilité du matériau). Aussi, il devra être prévu des dispositions constructives :

- Mise en place d'un dispositif souple type soufflet (ayant une fonction de joint d'étanchéité) autour de l'échantillon d'enrobé pour éviter les écoulements d'eau sur la périphérie de l'échantillon pendant tout l'essai. Pendant l'essai de perméabilité, l'échantillon sera fixe. Pendant l'essai mécanique de déformation, le déplacement vertical de l'échantillon pourra aller jusqu'à 250 mm.

**Critère d'évaluation :** Visuel. Absence d'écoulement d'eau en périphérie de l'échantillon d'enrobé pendant l'essai de perméabilité et l'essai mécanique de déformation.

Le nombre de soufflets fourni avec le banc d'essai devra être suffisant pour réaliser les essais suivants :

- 12 essais sur des plaques carrées d'épaisseur 40 mm et de longueur 380 mm ;
- 8 essais sur des plaques carrées d'épaisseur 80 mm et de longueur 380 mm ;
- 2 essais sur des plaques carrées d'épaisseur 80 mm et de longueur 500 mm ;
- 2 essais sur des plaques carrées d'épaisseur 200 mm et de longueur 500 mm.



# A4

## Bâti destiné au chargement hydraulique

Ce regroupement fonctionnel comporte 7 fonctions identifiées A4.1 ; A4.2 ; A4.3 ; A4.4 ; A4.5 ; A4.6 ; A4.7.

### A4.1 Permettre le chargement hydraulique de l'échantillon d'enrobé

#### *Commentaires :*

Le bâti devra supporter mécaniquement les chargements tout en assurant une étanchéité parfaite. Il y aura le maintien d'une **pression constante et uniforme** sur l'ensemble de l'échantillon d'enrobé durant les essais de perméabilité et de déformation.

Durant « l'essai sous eau », la migration de l'eau se fera à travers l'épaisseur de l'échantillon uniquement.

**Critère d'évaluation :** contact permanent entre le système de chargement hydraulique et l'échantillon d'enrobé à tester.

### A4.2 S'assurer que l'ensemble du bâti résiste aux poids de l'échantillon d'enrobé et aux niveaux de pressions hydrauliques

#### *Commentaires :*

Prise en compte du poids des échantillons d'enrobé à tester et des pressions hydrauliques pour le choix des matériaux qui composeront la structure du bâti (résistance mécanique, résistance à l'oxydation, etc). La masse volumique réelle de l'enrobé étanche (BBE) est égale à 2,4 Mg/ m<sup>3</sup>. La masse volumique réelle de l'enrobé drainant (BBDr) est égale à 2,6 Mg/ m<sup>3</sup>.

**Critère d'évaluation :** Le dispositif devra prendre en charge des éprouvettes de masse comprise 10 et 110 kg (non compris la charge d'eau).

### A4.3 Visualiser la déformation de l'échantillon au cours de l'essai

#### *Commentaires :*

Présence de deux fenêtres d'observation dans le bâti :

- dans la partie haute : au-dessus de la face supérieure de l'échantillon)
- dans la partie basse : sous le niveau inférieur de l'échantillon pour visualiser la déformation

Présence de caméras et appareils photos à l'extérieur du bâti pour enregistrer l'essai.

**Critère d'évaluation :** Visualisation avec une résolution suffisante pour suivre la déformation de l'échantillon (visualisation de déplacement de 0,1 mm).

#### **A4.4 S'assurer de l'étanchéité du banc d'essai**

**Commentaires :**

Pour chaque configuration d'essai (échantillon d'enrobé reposant sur support rigide perforé ; échantillon reposant sur support avec un orifice d'un diamètre donné, échantillon seulement fixé à ses extrémités), il ne devra y avoir aucune fuite.

**Critère d'évaluation :** A la réception du banc d'essai, la mise sous pression et la saturation seront réalisées sur une plaque « témoin ». Il ne devra y avoir aucune fuite d'eau.

#### **A4.5 Disposer d'un bâti mobile**

**Commentaires :**

Le bâti et les équipements annexes (PC, pompes,...) devront être mobiles pour pouvoir être déplacés dans une enceinte climatique (dimensions données dans la fonction A4.7). Ils devront être facilement déplaçables à l'intérieur d'un même bâtiment.

**Critère d'évaluation :** -

#### **A4.6 Disposer d'un bâti démontable**

**Commentaires :**

Le bâti et les équipements annexes (PC, pompes, etc.) devront être démontables pour pouvoir être déplacés et installés dans une enceinte climatique

**Critère d'évaluation :** Dimensions des éléments compatibles avec la porte de l'enceinte.

<b>A4.7 Disposer d'un bâti avec des dimensions compatibles avec celles de la chambre climatique disponible au laboratoire MIT de l'Université Gustave Eiffel</b>
--

**Commentaires :**

Les dimensions du bâti devront permettre de le positionner dans la chambre climatique du banc de fatigue du laboratoire MIT. Les équipements annexes (pompe, PC,...) seront positionnés à l'extérieur de la chambre climatique.

Les dimensions de la chambre climatique sont les suivantes (cf plan en annexe) :

- Longueur : 3,10 m
- Largeur : 1,60 m
- Ouverture de l'entrée : 0,80 m

La charge admissible dans la chambre climatique est égale à 40 000 N/m<sup>2</sup>.

**Critère d'évaluation :** les longueurs et largeurs du banc d'essai devront être strictement inférieures à 0,75 m.

# B1

## Système hydraulique de mise en pression de l'échantillon d'enrobé

Ce regroupement fonctionnel comporte 3 fonctions identifiées B1.1 ; B1.2 et B1.3.

### B1.1 Disposer d'un système d'asservissement de la pression chargement pendant l'essai

#### **Commentaires :**

Pendant l'essai à sec et en eau, la mise en pression sera asservie. La pression pourra varier de 0 à 3 bars. Elle sera appliquée sur la face supérieure de l'échantillon d'enrobé. Cette pression devra être uniforme sur l'ensemble de l'échantillon d'enrobé et elle devra rester constante.

L'essai sera réalisé 24h/24h. Le système de chargement devra s'arrêter automatiquement dans les deux cas suivants :

- Fuites à l'extérieur du bâti ;
- Rupture de l'échantillon d'enrobé et chute de matériaux dans le tamis de récupération.

Pour l'essai de perméabilité (échantillon reposant sur support amovible perforé), l'eau utilisée sera soit de l'eau désaérée ou de l'eau déminéralisée. Le dispositif devra être équipé d'une balance inversée permettant de suivre l'évolution de masse de l'échantillon. L'essai de perméabilité sera lancé lorsque le régime permanent sera atteint et lorsque la masse de l'échantillon sera constante.

En cas de variation brutale de la pression hydraulique, l'essai devra s'arrêter.

**NB 1 :** la mise en pression peut se faire par une vessie avec des armatures sous forme parallélépipédique ou tout autre dispositif adapté. Pour l'essai en eau, il devra y avoir un écoulement d'eau dans l'échantillon d'enrobé.

**NB2 :** Pour l'essai à sec, tout écoulement d'eau dans l'échantillon d'enrobé sera proscrit. Une solution d'étanchéification en surface sera proposée (avec une membrane d'étanchéité qui recouvre toute la surface de l'échantillon d'enrobé par exemple).

**Critère d'évaluation :**

- Mesure en continue de la pression de chargement.
- Pression donnée en bars.
- La pression sera renseignée par l'opérateur dans le système.
- La résolution d'affichage des valeurs est 0,01 bars (1kPa).
- **Pression pouvant varier entre 0 et 3 bars**
- Détecteur d'humidité (ou d'eau) en partie inférieure du bâti ;
- Mesure en continu de la masse d'eau pour un essai de perméabilité et mesure en continu des matériaux récupéré dans le tamis récupérateur pour un essai de déformation
- La résolution d'affichage des valeurs est 0,01 bars.

<b>B1.2 Disposer d'un tamis et d'un bac de récupération de l'eau</b>
--

**Commentaires :** Le tamis récupèrera les morceaux d'enrobés qui se détacheront de l'échantillon pendant l'essai. Le tamis devra être amovible. Le bac récupèrera l'eau. Il devra être amovible.

**Critère d'évaluation :** Il ne devra pas y avoir de morceaux d'enrobé dans le bac récupérateur d'eau.  
Le tamis sera à maille carré d'ouverture 0,1 mm. Deux tailles seront à prévoir : pour les plaques 380\*380 et pour les échantillons de taille 500\*500.

<b>B1.3 Disposer d'un réservoir d'eau pour l'alimentation en eau</b>
--

**Commentaires :** L'essai sera réalisé 24h/24h. Le système d'alimentation en eau sera constitué d'un réservoir autonome avec une capacité suffisante pour permettre le déroulement de l'essai.

# C1

## Collecte des données horodatées

Ce regroupement fonctionnel comporte 7 fonctions identifiées C1.1 ; C1.2 ; C1.3 ; C1.4 ; C1.5 ; C1.6 et C1.7.

**Toutes les données seront horodatées (précision : seconde)**

### C1.1 Suivre l'évolution de la flèche de l'échantillon

**Commentaires :** le déplacement vertical de l'échantillon en sa partie centrale, à savoir la flèche, devra être mesuré pendant tout l'essai. La flèche pourra varier entre 0 et 200 mm. Un capteur LVDT ou équivalent pourra être utilisé. Il devra être centré au-dessus du corps d'épreuve. Un dispositif anti-poinçonnement (plaque métallique ou autre) devra être mis en place sur le palpeur pour éviter tout problème de poinçonnement de l'échantillon aux températures d'essais élevées.

**Critère d'évaluation :** une information immédiate à l'opérateur. La flèche sera donnée en mm. Les tolérances à respecter :  $\pm 1$  mm

### C1.2 Suivre l'évolution de la rotation des appuis

**Commentaires:** L'angle de rotation des appuis sera mesuré pendant tout l'essai. Le capteur sera étanche.

**Critère d'évaluation:** Une information immédiate à l'opérateur. L'angle sera donné en ° (par rapport à l'axe horizontal). Les tolérances à respecter :  $\pm 1$  °

### C1.3 Suivre l'évolution de la quantité d'eau à l'entrée du système de saturation

**Commentaires:** Le volume d'eau injectée dans le système de chargement sera mesuré en continu pendant l'essai. Le bac récupérateur devra être amovible.

**Critère d'évaluation :** Une information immédiate à l'opérateur.

- le volume sera donné en l
- les tolérances à respecter :  $\pm 0,1$  ml

#### **C1.4 Suivre l'évolution de la quantité d'eau dans le bac**

**Commentaires:** La masse d'eau récupérée dans le bac sera quantifiée en continu pendant l'essai.

**Critère d'évaluation :** Une information immédiate à l'opérateur.

- la masse sera donnée en g
- les tolérances à respecter :  $\pm 0,1$  g

#### **C1.5 Suivre l'évolution de la quantité de matériaux dans le tamis récupérateur**

**Commentaires:** La masse de matériaux récupérée dans le tamis récupérateur sera quantifiée en continu pendant l'essai.

**Critère d'évaluation :** Une information immédiate à l'opérateur. En cas d'augmentation brutale de la masse, arrêt immédiat des systèmes de saturation et chargement.

- la masse sera donnée en g
- les tolérances à respecter :  $\pm 0,1$  g

#### **C1.6 Suivre l'évolution de la température dans le bâti**

**Commentaires:** une sonde de température sera placée dans le bâti pour connaître la température d'essai. Lorsque le banc d'essai sera placé dans une enceinte thermo-régulée, la température pourra varier entre 0°C et 35°C.

**Critère d'évaluation :** Une information immédiate à l'opérateur.

- la température sera donnée en °C
- les tolérances à respecter :  $\pm 1$  °C

#### C1.7 Enregistrer la durée de l'essai

**Commentaires:** La durée de l'essai sera enregistrée.  
Pour l'essai de perméabilité, il démarre dès l'atteinte du régime permanent (c'est-à-dire masse enrobé constante) et il pourra durer de 1h jusqu'à 72h suivant la quantité d'eau traversant le matériau.  
Pour l'essai de déformation, il démarre dès la mise en chargement et il s'arrête dès qu'un morceau d'enrobé tombe dans le tamis récupérateur.

**Critère d'évaluation :** Une information immédiate à l'opérateur.

- le temps d'essai est donné en s
- les tolérances à respecter :  $\pm 10$  s



## C2

### Traitement et édition des résultats

Ce regroupement fonctionnel comporte 3 fonctions identifiées C2.1 ; C2.2 et C2.3.

#### C2.1 Calculer la perméabilité de l'échantillon

**Commentaires:** Il s'agit de calculer la perméabilité de l'échantillon (unité : m/s) à partir des données d'entrée et des mesures de volume d'eau d'entrée et de masse d'eau en sortie dans le bac récupérateur (cf formule de calcul en partie 4 « récapitulatif des valeurs utiles » du présent cahier des charges.

**Critère d'évaluation:** Format brut type CSV + format exploitable avec logiciel Excel ou Calc  
Une information immédiate à l'opérateur en cas de non-conformité constatée lors de l'essai de perméabilité.

#### C2.2 Enregistrer les valeurs calculées

**Commentaires:** Ce stockage doit comporter les informations d'identification nécessaires à la réalisation d'un procès-verbal d'essai.

**Critère d'évaluation:** Format brut type CSV + format exploitable avec logiciel Excel ou Calc

#### C2.3 Visualiser les courbes de résultats

**Commentaires:** Il s'agit de permettre à l'opérateur de visualiser des courbes d'essai.

**Critère d'évaluation:** 2 représentations graphiques suivantes :

- évolution du volume d'eau récupérée pendant l'essai
- évolution de la flèche de l'échantillon en fonction du temps.

## C3

### Enregistrement des évènements

Ce regroupement fonctionnel comporte 2 fonctions identifiées C3.1 et C3.2.

#### C3.1 Enregistrer l'ensemble des informations liées au fonctionnement du banc d'essai

**Commentaires :** L'ensemble des informations en lien avec le fonctionnement du banc d'essai devra être enregistré dans un fichier évènement.

**Critère d'évaluation :** un fichier « évènement » sera créé pour chaque essai. Le fichier pourra être réinitialisé à chaque lancement d'essai

#### C3.2 Enregistrer l'ensemble des informations liées au déroulement de l'essai

**Commentaires :** Ce stockage doit comporter les informations en lien avec le déroulement de l'essai, de sorte que l'opérateur puisse avoir les moyens de statuer sur la validité de l'essai, ou déterminer l'origine d'une anomalie.

**Critère d'évaluation :** Un fichier texte « journal de l'essai », récapitulant les informations en lien avec :

- Les caractéristiques de l'échantillon ;
- Le paramétrage de l'essai ;
- La température ;
- La mesure de masse d'enrobés dans le tamis récupérateur ;
- La mesure de masse d'eau dans le bac récupérateur ;
- La mesure du volume d'eau injectée dans le système de chargement ;
- La mesure de la pression appliquée dans le système de chargement ;
- Les résultats des essais.

# C4

## Enregistrement de l'essai

Ce regroupement fonctionnel comporte 2 fonctions identifiées C4.1 et C4.2

**Toutes les données seront horodatées (précision : seconde)**

### C4.1 Enregistrer l'essai avec des dispositifs de caméras et appareil photos (en mode time lapse)

**Commentaires :**

L'essai sera enregistré sous 4 angles de vue. Il est prévu l'implantation de 4 appareils d'enregistrement :

- 1 appareil photo à grand angle. Cet appareil photo sera placé dans un hublot plan en partie supérieure au-dessus du réservoir d'eau et sera excentré. La distance entre le bâti (où sera positionné l'appareil photo) et le haut de la plaque est de 15 cm environ. L'appareil photo caméra sera équipé d'un zoom optique intégré (+ commande électronique du zoom) pour voir plus en détail la surface du matériau ;
- 1 caméra latérale dans la partie supérieure du banc d'essai ;
- 1 appareil photo grand-angle « eye fish » sous l'échantillon ;
- 1 caméra latérale dans la partie inférieure du banc d'essai.

**Critère d'évaluation :** *Des répertoires images et vidéos* seront créés pour chaque essai. Le lancement des 2 appareils photos et des 2 caméras au démarrage de l'essai devra se faire simultanément.

Les deux appareils photos fonctionneront en mode time lapse. Le pas de temps entre chaque prise de vue sera d'une seconde. Les appareils devront posséder des capacités de stockage pour des expérimentations pouvant durer jusqu'à 72h.

Les appareils photos et caméras ne seront pas immergés. L'appareil photo grand angle « eye fish » sous l'échantillon devra être étanche (risque de contact avec l'eau pendant l'essai lors de la rupture de l'échantillon).

***Les caméras devront détecter des ouvertures de fissures à partir de 0,1 mm d'ouverture.***

La taille de la zone à imager dépendra de la taille de l'échantillon. Il pourra s'agir d'une zone de 380 mm \* 380 mm ou d'une zone 500 mm \* 500 mm. La couleur de la surface à imager sera brun, noir (couleur du bitume). Un quadrillage blanc sera dessiné sur la face supérieure de l'échantillon pour faciliter la détection des déformations de l'échantillon.

#### **C4.2 Disposer d'éclairage annulaire autour des appareils photos**

**Commentaires :** ***Les appareils photos supérieurs et inférieurs seront équipés d'éclairage annulaire LED*** afin de pouvoir disposer d'un enregistrement de qualité. Le hublot où sera installé l'appareil photo supérieur devra prendre en compte la taille de l'anneau d'éclairage.

**Critère d'évaluation :** un dispositif éclairant la partie supérieure de l'échantillon d'enrobé. Un dispositif éclairant la partie inférieure de l'échantillon d'enrobé.

# C5

## Pilotage de l'essai

Ce regroupement fonctionnel comporte 1 fonction identifiée C5.1

<b>C5.1 Commander l'essai et accéder aux données</b>
--

**Commentaires:** Un ordinateur sera fourni avec le banc d'essai afin de piloter l'essai et d'avoir accès à l'ensemble des données en continu. Un logiciel d'exploitation sera créé pour répondre aux fonctionnalités demandées.

**Critère d'évaluation:** -

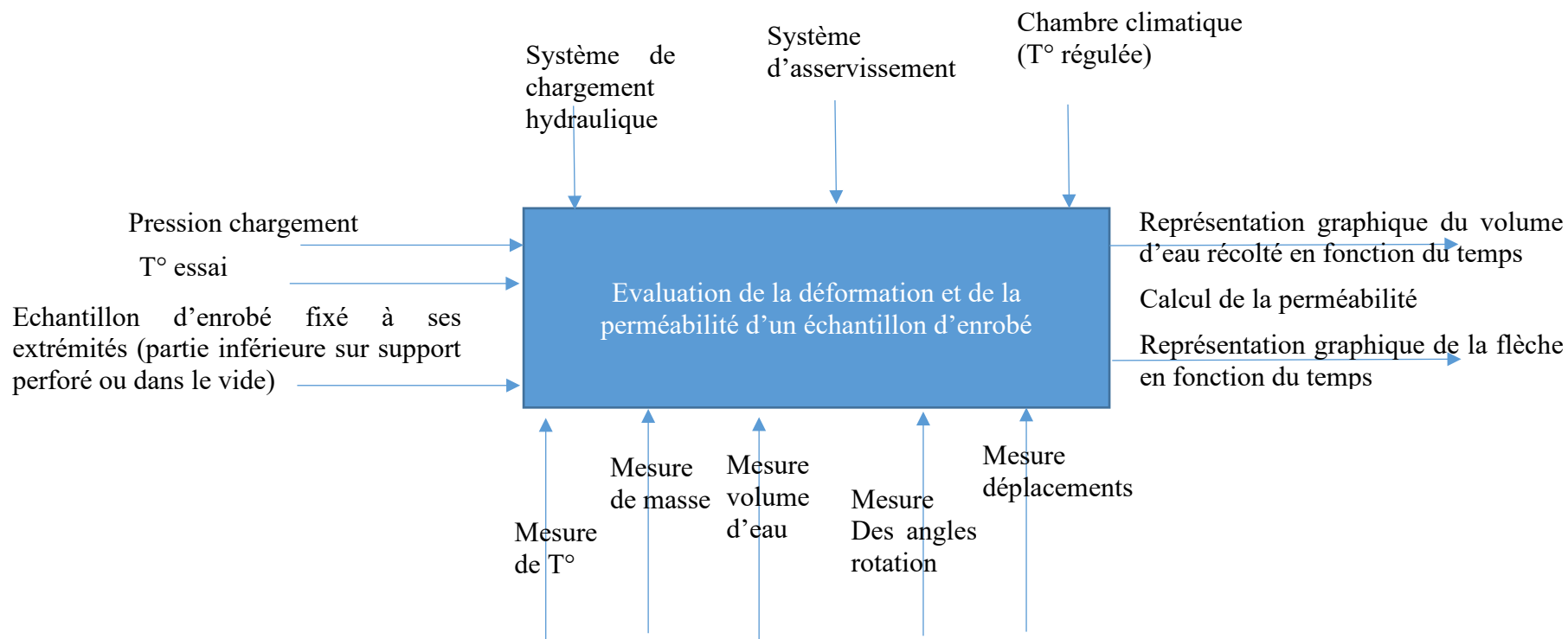
### 3 - Représentation graphique (actigrammes)

#### 3-1 Schéma synoptique du principe de l'essai

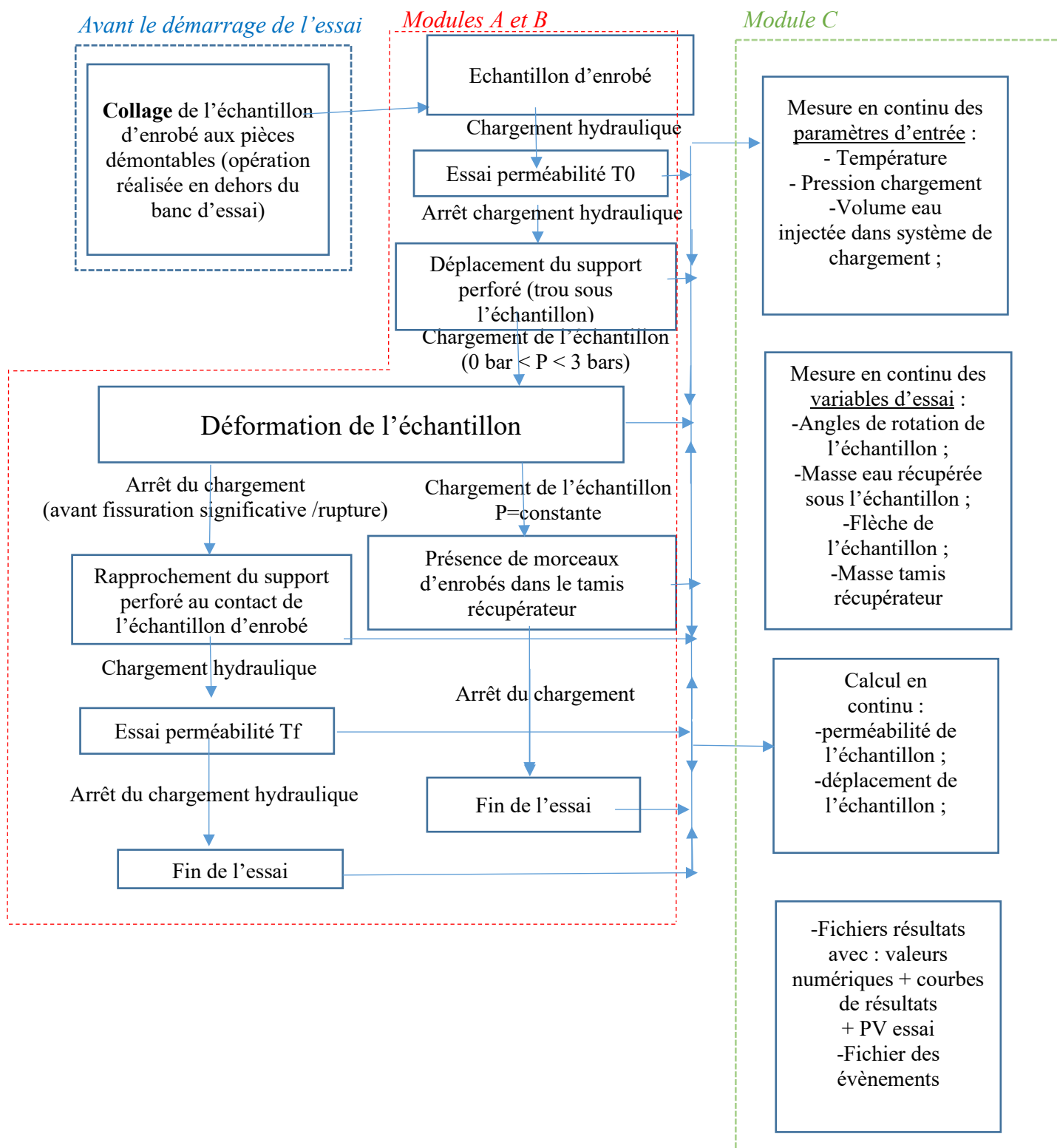
Essai réalisé pour une épaisseur donnée d'un échantillon d'enrobé.

La pression de chargement est donnée et l'essai se déroule à une température contrôlée (par le banc d'essai) et régulée (par la chambre climatique).

Les essais sont réalisés sur des plaques carrés de dimensions variables (380 mm \* 380 mm jusqu'à 500 mm\*500 mm).



### 3-2 Procédure de l'essai en eau

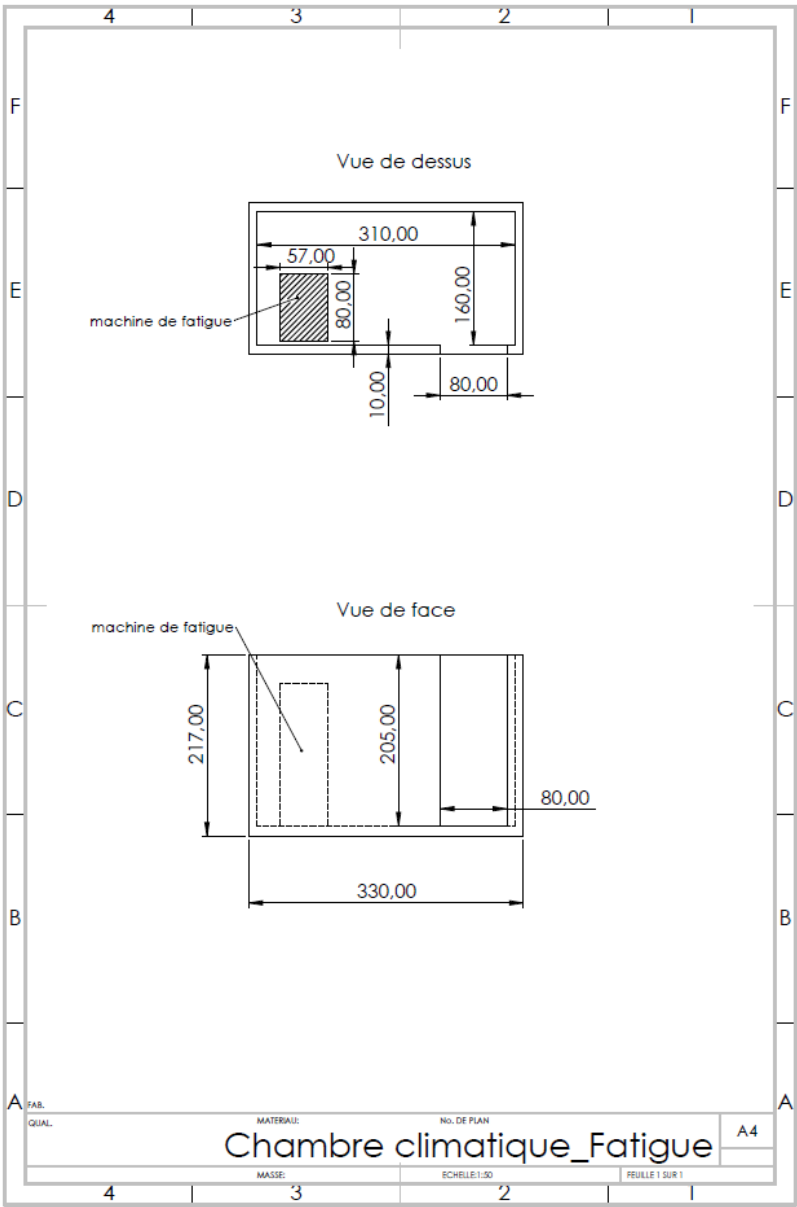


## 4- RECAPITULATIF DES VALEURS UTILES

Nom		Unités	Formules
Numéro de plaque	N°		
épaisseur	e	m	Valeur entrée ( $10^{-3}$ m )
Longueur	L	m	Valeur entrée ( $10^{-3}$ m )
Largeur	l	m	Valeur entrée ( $10^{-3}$ m )
Masse échantillon d'enrobé	m <sub>enrobé</sub>	Kg	Valeur mesurée ( $10^2$ Kg )
Masse morceaux enrobés récupérés dans le tamis récupérateur	m <sub>enrobé_tamis</sub>	Kg	Valeur mesurée ( $10^{-4}$ Kg )
Angle rotation appui droite	$\phi_d$	°	Valeur mesurée ( ° )
Déformation au centre de l'échantillon (flèche)	f	m	Valeur mesurée ( $10^{-3}$ m )
Angle rotation appui gauche	$\phi_g$	°	Valeur mesurée ( ° )
Volume eau injectée dans le dispositif de chargement	V <sub>injectée</sub>	m <sup>3</sup>	Valeur entrée et mesurée ( $10^{-3}$ m <sup>3</sup> ) → asservissement
Pression de chargement	P <sub>c</sub>	bar	Valeur entrée et mesurée ( bar ) → asservissement
Masse d'eau récupérée dans le bac	m <sub>eau</sub>	Kg	Valeur mesurée ( $10^{-4}$ Kg )
Volume eau ayant transité à travers l'échantillon sur la durée de l'essai	dV	m <sup>3</sup>	Valeur calculée : dV= m <sub>eau</sub> x $10^{-3}$
Durée de l'essai	dt	s	Valeur mesurée (s)
Charge hydraulique	H	m	Valeur calculée exprimée en hauteur d'eau à partir de la pression de chargement (P <sub>c</sub> = $\rho$ gH) - P <sub>c</sub> =0,1x H (avec P <sub>c</sub> exprimé en bar) soit H=10 x P <sub>c</sub>
Température de l'essai	T	°C	Valeur mesurée ( °C )
Section de l'échantillon	S	m <sup>2</sup>	Valeur calculée : S=L x l
Perméabilité	k	m/s	Valeur calculée ( $10^{-10}$ m/s ) : $k = \frac{dV \times e}{dt \times S \times H}$ Avec : k : coefficient de perméabilité (m/s) dV : volume d'eau ayant transité à travers l'éprouvette sur la durée de l'essai (m <sup>3</sup> ) dt : durée de l'essai (s) S : section de l'éprouvette (m <sup>2</sup> ) e : épaisseur de l'éprouvette (m) H : charge hydraulique exprimée en hauteur d'eau (m)



Annexe : plan chambre climatique (fonction A47)



**Fin du cahier des charges**