

Béton hydraulique – Mise en œuvre

Rhéologie et maturité des bétons

par **Jean-Marie GEOFFRAY**

Cete de Lyon. Laboratoire régional de Clermont-Ferrand

1. Rhéologie des bétons frais	C 2 227 –	2
1.1 Le béton comme corps de Bingham	–	2
1.2 Bétons serrables par apport externe d'énergie	–	2
1.3 Bétons auto-plaçants	–	5
1.4 Incidents rhéologiques	–	7
1.5 Effets de la température ambiante	–	8
2. Prévision de la résistance du béton dans l'ouvrage	–	9
2.1 Différentes méthodes	–	9
2.2 Maturométrie	–	9
2.3 Étalonnage préliminaire	–	11
3. Suivi de la maturité du béton dans l'ouvrage	–	14
3.1 Préparation du chantier	–	14
3.2 Étalonnage	–	14
3.3 Suivi de la maturité	–	16
Pour en savoir plus	Doc. C 2 231	

Le béton, composant utilisé dans de nombreux cas de constructions, doit satisfaire à un ensemble d'exigences de sécurité, de durabilité et d'esthétique. Pour atteindre la satisfaction de ces exigences à l'état durci, il est clair qu'il doit d'abord présenter une robustesse de ses caractéristiques rhéologiques à l'état frais et, plus précisément, au moment de sa mise en place finale dans le coffrage.

Le véritable matériau de construction étant le béton armé (armatures et/ou fibres), le béton se doit d'assurer la protection de ces armatures, et cette fonction ne peut être remplie qu'après prise en compte de la notion d'enrobage minimal de ces dernières. Il ne faut pas davantage oublier que le matériau doit être protégé contre la dessiccation juste après coulage, puis juste après démoulage. Dans certains cas, la surface du béton est soumise à un traitement, ou reçoit un revêtement : ces opérations doivent être soigneusement étudiées en amont pour adapter le support.

Après avoir défini les objectifs à atteindre, les conditions de mise en œuvre doivent faire l'objet d'un cahier des charges intégrant toutes les phases de la construction :

- les coffrages et armatures ;
- les transports et coulages du béton (par gravité, pompage ou projection) ;
- le mode de serrage du béton (par vibration, par auto-plaçance) ;
- les adaptations de bétonnage liées aux conditions ambiantes attendues pendant la durée du chantier ;
- l'éventuel besoin de coulage d'éléments de fondation profonde, de coulage en grande masse, ou dans l'eau ;
- et, bien entendu, les différents traitements de surface prescrits.

L'ensemble de ces opérations sera présenté sous 5 volets :

- rhéologie des bétons frais et maturité des bétons ;
- coffrages et armatures (dossier [C 2 228]) ;
- bétonnage (dossier [C 2 229]) ;
- bétonnages spéciaux (dossier [C 2 230v2]) ;
- démoulages et parements (dossier [C 2 231]).

Dans cette première partie, le lecteur trouvera plutôt les bases nécessaires à la conception et à la préparation du chantier en matière de rhéologie du béton frais, d'une part, et aux dispositions à prévoir (et à mettre en œuvre) pour connaître les caractéristiques mécaniques du béton permettant des interventions sur béton jeune, telles que mises en tensions des armatures de précontrainte ou, plus simplement, de décoffrage.

1. Rhéologie des bétons frais

1.1 Le béton comme corps de Bingham

Le comportement rhéologique d'un matériau est caractérisé par une équation d'état rhéologique qui permet de relier les valeurs de contraintes aux déformations et à leurs dérivées de divers ordres par rapport au temps [4]. Ces équations d'états idéologiques sont représentées par des courbes dites « d'écoulement » (dépendance entre la contrainte de cisaillement et le gradient de vitesse).

Les différents types de comportements rhéologiques se subdivisent en trois catégories (figure 1) :

- **exclusivement visqueux**, lorsque l'écoulement se produit dès l'apparition d'une contrainte de cisaillement, aussi faible soit-elle. C'est le cas des corps newtoniens (courbe I), pseudo-plastiques ou fluidifiants (courbe II) et dilatants (courbe III – figure 1 a) ;
- **visco-plastique**, lorsque l'écoulement ne se produit qu'à partir d'un seuil de cisaillement. On distingue dans ce cas le comportement binghamien (courbe IV) et le comportement dilatant (courbe V – figure 1 b) ;
- **plastique** (courbe VI – figure 1 c).

La réponse d'une pâte de ciment lors d'un cisaillement à vitesse donnée – reproduisant ainsi ce qui se passe lorsque le béton s'écoule dans le coffrage – montre que le comportement du matériau est celui d'un fluide de Bingham. Ce comportement se caractérise par l'ordonnée de la droite à l'origine (seuil de cisaillement τ_0), contrainte minimale à exercer pour que le matériau se déforme, et par la pente de cette droite (viscosité plastique μ). Aux grandes vitesses de cisaillement, les courbes s'écartent de la linéarité [3].

1.2 Bétons serrables par apport externe d'énergie

Le seuil de cisaillement est le facteur qui limite l'écoulement du béton dans le coffrage. Pour franchir ce seuil de cisaillement et,

donc, permettre au béton de s'écouler, de remplir le plus rapidement possible le coffrage, et d'atteindre une compacité optimale, il est nécessaire de lui apporter de l'énergie.

Cet apport d'énergie peut être recherché par vibration. Ce qui a constitué, jusqu'à présent, la technique la plus courante. À cet effet, le comportement sous vibration d'une pâte de ciment se situe entre les modèles de Newton et de Bingham [3].

1.2.1 Comportement rhéologique sous vibration

Sous l'effet de la vibration, apparaît une réorganisation alternative rapide de faible amplitude granulaire, pour aboutir à :

- un remplissage complet du moule ;
- un enrobage des armatures ;
- une compacité optimale de la matrice (effet de serrage), sous l'effet de forces dues à la pesanteur.

Il convient de préciser que l'énergie absorbée par le béton est d'autant plus grande que sa compacité est faible et, qu'après serrage, l'énergie n'est plus absorbée mais transmise, avec parfois apparition de ségrégation dans la matrice.

1.2.2 Essais usuels de consistance

Il existe un nombre important de méthodes d'essais permettant d'apprécier la consistance d'un béton frais. Si tous ces essais conduisent à une caractéristique propre au matériau et liée à son ouvrabilité sur chantier, elles présentent des susceptibilités relatives à des paramètres tels que la teneur en eau, en éléments fins, les proportions relatives de granulats entre eux, les moyens de mise en place du béton avant l'essai, les degrés de liberté autorisés pour la déformation de l'échantillon en cours d'essai. Il est donc rare de pouvoir corréler correctement les résultats obtenus sur l'ensemble de ces essais [1].

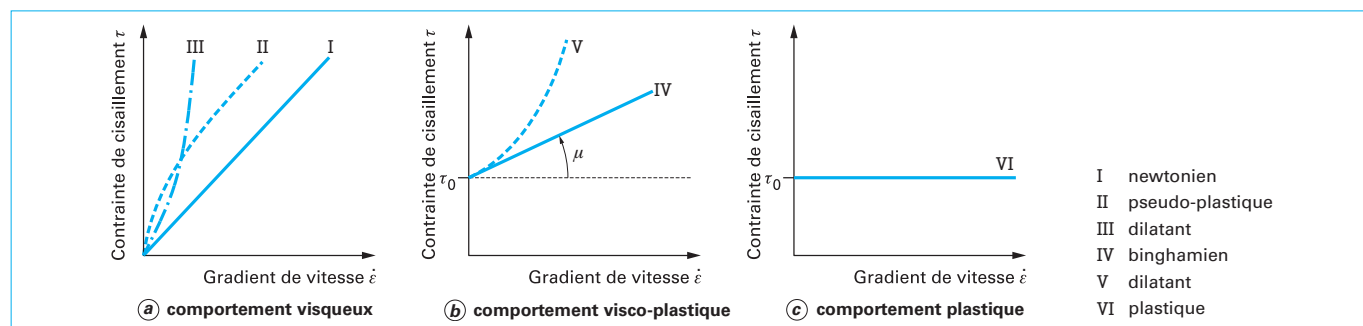


Figure 1 – Comportements rhéologiques. Courbes d'écoulement

Le choix de l'essai est donc réalisé de façon à mieux rendre compte du comportement du béton lors de sa mise en œuvre. Ainsi, il ne serait guère judicieux de réaliser un essai avec vibration alors que le béton n'est pas prévu pour être vibré sur chantier. À cet effet, les paramètres suivants sont à prendre en compte lors de la réalisation de l'essai et l'interprétation de ses résultats :

- l'état du béton en cours d'essai (équilibre, mouvement par gravité seule, mouvement sous vibration) ;
- la représentativité de l'échantillon, notamment par sa taille ;
- la nature de la grandeur mesurée (position d'équilibre, durée d'écoulement, vitesse de déformation, état physique particulier).

Les habitudes de chantier conduisent couramment à préférer un ou deux types d'essais bien connus, même si ceux-ci ne sont pas toujours parfaitement adaptés au matériau ou à sa mise en œuvre. Il est alors nécessaire de recourir à des calibrations et d'accepter le risque d'avoir des réponses parfois peu pertinentes.

Les différentes méthodes d'essais retenues, soit pour leur diffusion, soit pour leur pertinence technique, sont listées en suivant.

■ Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams

Encore connue sous le vocable « *slump-test* » (norme ISO 4109), elle reste la méthode la plus usitée (norme NF EN 12350-2). Il s'agit d'un essai quasi statique où une différence de hauteur est mesurée entre un volume de béton, préalablement moulé par piquage dans un coffrage en forme de tronc de cône, et ce même échantillon démoulé et affaissé (figure 2).

Les résultats sont donnés en millimètres d'affaissement et perdent une partie de leur signification à partir d'un affaissement supérieur à 18 cm (tableau 1). Un autre type d'essai plus discriminant doit alors être recherché.

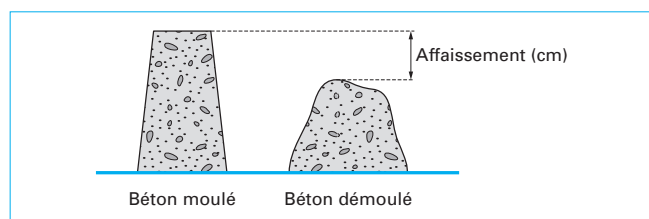


Figure 2 – Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams

Tableau 1 – Incertitudes de mesure de l'affaissement au cône d'Abrams

Plages de valeurs concernées	Incertitudes
Entre 1 et 4 cm	± 1 cm
Entre 5 et 21 cm	± 2 cm
21 cm	± 3 cm

■ Mesure de l'affaissement au cône modifié

Elle est réservée pour analyser les bétons à gros gravillons ($D = 40$ mm), notamment en technique routière. L'essai est conduit selon la norme NF P 98-248-2 de la même façon que précédemment, mais avec un moule tronconique de dimensions supérieures.

■ Méthode *slump-walz* WA

Elle permet d'évaluer l'ouvrabilité d'un béton et de suivre son évolution dans le temps. L'essai est réalisé avec le cône d'Abrams posé sur la table vibrante du walz.

Dans la méthode WA, on mesure un premier tassement obtenu à l'intérieur du moule et à la stabilisation sous vibration imposée, puis l'affaissement total, après démoulage, h en cm. Le coefficient WA est donné par la relation [2] :

$$WA = \frac{30}{30 - h}$$

Les valeurs de WA varient entre 1 et 3, et décroissent en fonction de l'âge du béton frais (4 h au maximum).

À noter que si le béton est fluide, il n'y a pas de tassement à la vibration, mais un effondrement au démoulage. Alors que si le béton est sec il se produit au contraire un tassement important sous vibration, et il n'y a pas d'affaissement au démoulage.

Cette méthode est particulièrement intéressante pour évaluer le comportement des bétons destinés à être mis en œuvre dans les coffrages glissants, ou à être démoulés instantanément en préfabrication.

■ Méthode Vébé

Elle permet d'évaluer l'ouvrabilité d'un béton. L'essai est réalisé dans les conditions quasi inverses du *slump-walz* (norme NF EN 12350-3). L'affaissement statique dans un vase cylindrique est noté avant la mesure du temps d'étalement complet dans ce même récipient soumis à vibration (figure 3).

Si ce temps d'étalement, dit « **temps Vébé** », est inférieur à 5 s, ou supérieur à 30 s, le béton présente une consistance pour laquelle la méthode d'essai ne convient pas. La méthode est surtout utile pour les bétons peu maniables, et non pas pour les bétons dont la dimension maximale de granulat dépasse 40 mm.

■ Maniabilité LCL (laboratoire central – Lesage)

Elle est déterminée par la mesure du temps d'écoulement d'un échantillon de béton soumis à vibration. Cette méthode s'appuie sur un essai dynamique, mais n'est pas adaptée pour les bétons fluides. Le maniabilimètre est constitué par une cuve parallélépipédique rectangulaire, divisée en deux compartiments par un dièdre amovible, et sur l'extérieur de laquelle est fixé un vibreur (figure 4).

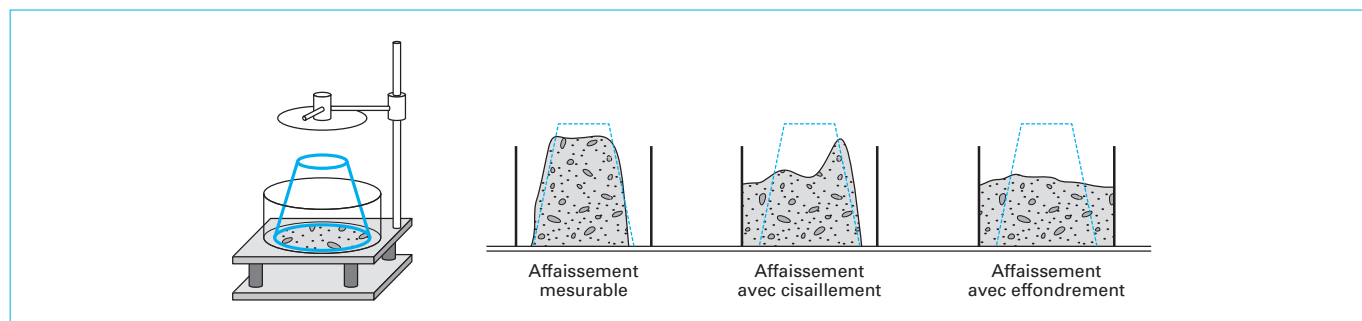


Figure 3 – Essai Vébé

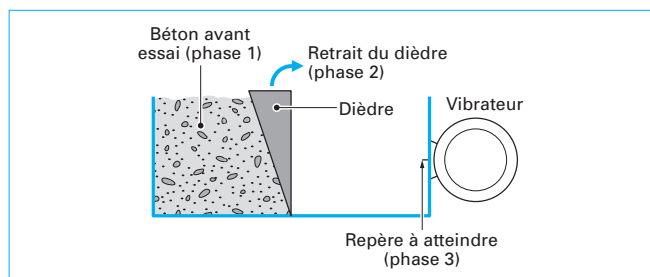


Figure 4 – Maniabilimètre laboratoire central – Lesage

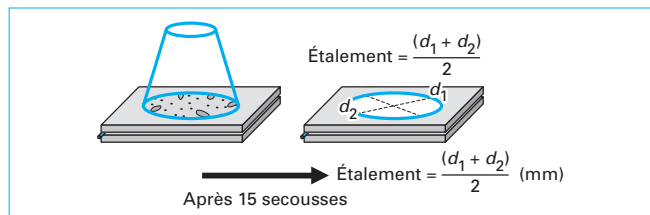


Figure 5 – Essai d'étalement à la table à secousses

L'échantillon est placé dans le compartiment le plus éloigné du vibreur. Le retrait du séparateur en forme de dièdre déclenche la vibration de l'ensemble et le béton s'écoule dans le compartiment laissé vide jusqu'à un repère donné. Les temps d'écoulement pour atteindre ce repère donnent une bonne idée de la maniabilité des bétons frais à un instant donné, et les mesures effectuées à différentes températures et à différents âges sur un même béton frais permettent de déterminer sa durée pratique d'utilisation dans toutes les conditions de chantier.

Les indications fournies par cette mesure sont précieuses, car elles permettent d'optimiser les bétons en fonction de leur comportement sous vibration. Cependant, la lourdeur du matériel et l'importance de la taille des échantillons (35 l de béton par prise d'essai) freinent considérablement la diffusion de la méthode.

■ Essai d'étalement sur table à secousses

Il permet la mesure de l'étalement d'un tronc de cône de béton préalablement moulé, puis démoulé et soumis à des secousses transmises par l'intermédiaire du support. La consistance est appréciée par la mesure du diamètre de l'échantillon de béton affaissé (norme NF EN 12350-5 – figure 5).

Cet essai réalisé sur chantier est assez bien adapté aux bétons fluides. Sa réponse, intéressante du fait qu'elle est liée à la cohésion du matériau, reste cependant médiocre du point de vue répétabilité. L'incertitude de mesure est estimée à ± 30 mm sur toute la gamme des bétons, de très plastiques à fluides.

■ Plasticimètre

Il permet d'apprécier approximativement la consistance du béton frais par la mesure de l'effort de cisaillement en rotation, appliqué par une tête à trois ailettes plongée dans le béton (figure 6). Cet essai est plutôt réservé aux bétons, de fermes à très plastiques.

Il reste facile à réaliser, mais présente une reproductibilité des résultats assez moyenne et nécessite :

- la mise au point d'une procédure fixant la taille minimale du corps d'épreuve et la pénétration du dispositif dans le béton, d'une part ;
- un étalonnage préalable contradictoire avec les mesures d'affaissement au cône d'Abrams pour chaque type de béton, d'autre part.

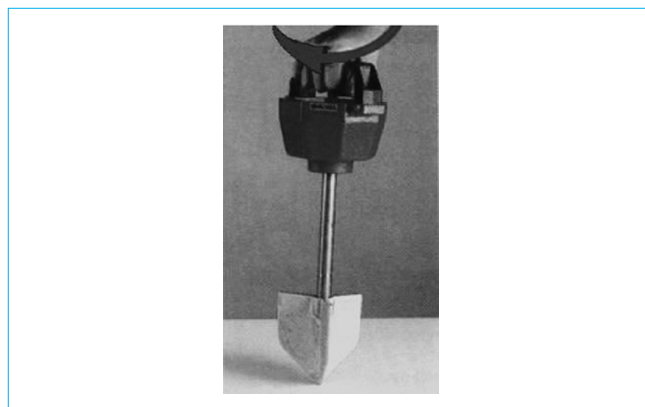


Figure 6 – Plasticimètre

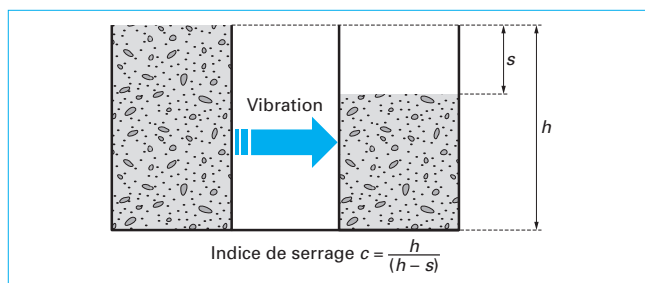


Figure 7 – Essai de compactabilité

■ Mesure de l'indice de compactabilité

Elle repose sur la détermination de la réduction de volume d'un béton soumis à un serrage par vibration interne (aiguille vibrante à fréquence minimale de 120 Hz) ou externe (table vibrante à fréquence minimale de 40 Hz).

Le degré de compactabilité (encore appelé « indice de serrage ») d'un volume donné de béton frais est calculé par le rapport du volume non compacté au volume compacté. Il constitue ainsi un moyen d'approche de la consistance applicable aux bétons fermes à très plastiques et n'ayant pas de granulats dont le diamètre excède 40 mm (norme NF EN 12350-4 – figure 7).

■ Wattmètre

Pendant la fabrication du béton, le wattmètre est un indicateur de la puissance instantanée nécessaire au malaxage du béton. L'établissement du palier de la puissance dissipée par le moteur correspond aux limites d'efficacité du malaxeur. L'indication reçue au wattmètre est naturellement liée à la plasticité du béton mais, à proprement parler, son recours ne correspond pas vraiment à un essai de consistance.

Il existe des méthodes dérivées ou proches, qui consistent à réguler en temps réel la consistance du béton en cours de fabrication (servo-ouvrabilimètre). Le frottement d'un palpeur plongé dans la veine du béton en cours de malaxage est minimisé par des ajouts progressifs d'eau. Ces méthodes « interactives », actuellement plutôt réservées à la préfabrication, nécessitent un étalonnage préalable.

■ Rhéomètre à béton

Développé par le LCPC, il permet de caractériser le comportement d'un échantillon de béton frais soumis à un mouvement de torsion [3]. Ce matériel prend, aussi bien en compte les considérations du scientifique, que celles du praticien de chantier. Il est spécialement adapté aux bétons très plastiques et fluides, et permet d'évaluer les effets de la vibration, les évolutions de la maniabilité de ces bétons frais dans le temps, et les effets de la température.

Tableau 2 – Classes d'affaissement au cône d'Abrams

	Classes de consistance	Affaissement (mm)
S1	ferme	de 10 à 40
S2	plastique	de 50 à 90
S3	très plastique	de 100 à 150
S4	fluide	de 160 à 210
S5		≥ 220

Tableau 3 – Classes Vébé

Classes	Temps Vébé (s)
V0	≥ 31
V1	30 à 21
V2	20 à 11
V3	10 à 6
V4	5 à 3

Tableau 4 – Classes de compactabilité

Classes	Indices de compactabilité (serrage)
C0	≥ 1,46
C1	1,45 à 1,26
C2	1,25 à 1,11
C3	1,10 à 1,04
C4	< 1,04 (pour les bétons légers)

Tableau 5 – Classes d'étalement

Classes	Diamètres d'étalement (mm)
F1	≤ 340
F2	350 à 410
F3	420 à 480
F4	490 à 550
F5	560 à 620
F6	≥ 630

Tableau 6 – Niveaux de maniabilité LCL

Niveaux de maniabilité du béton	Temps t d'écoulement (s)
Fluide	$t < 2$
Ouvrable	$2 < t < 10$
Peu maniable	$10 < t < 20$
Non utilisable avec les méthodes courantes	$20 < t < 60$
Non utilisable	$t > 60$

L'échantillon de béton frais a la forme d'un cylindre creux et se trouve soumis à un cisaillement entre deux plans horizontaux. La conduite automatisée de l'essai permet d'accéder aux deux grandeurs physiques qui constituent les caractéristiques rhéologiques du matériau : le seuil de cisaillement et la viscosité plastique, avec ou sans vibration.

1.2.3 Gamme de consistance des bétons frais

Selon la norme NF EN 206-1, la consistance des bétons frais peut être déterminée par plusieurs méthodes (voir les tableaux 2, 3, 4, 5 et 6) :

- essai d'affaissement au cône d'Abrams (norme NF EN 12350-2) ;
- essai Vébé (norme NF EN 12350-3) ;
- mesure de l'indice de compactabilité (norme NF EN 12350-4) ;
- essai d'étalement sur table à secousses (norme NF EN 12350-5) ;
- par toute autre méthode d'essai convenue (maniabilité LCL, rhéomètre, wattmètre, ...).

Pour les 4 premiers essais, les classes de consistance sont définies par la norme, en fonction des niveaux de valeurs atteints :

À titre de rappel, il n'existe pas de relation entre les classes des différents essais, qui doivent être choisis en amont en fonction du type de béton utilisé.

Il est également nécessaire de prendre en compte l'âge du matériau au moment de l'essai.

1.3 Bétons auto-plaçants

Les bétons auto-plaçants sont des matériaux fluides, homogènes et stables qui ont la particularité de se serrer totalement, sans apport extérieur d'énergie. À cet effet, il convient de signaler qu'il est inutile de rechercher un quelconque effet extérieur au moment du coulage (par exemple, augmentation de la hauteur de chute) pour favoriser l'auto-plaçance.

1.3.1 Comportement rhéologique à l'écoulement

La grande fluidité des bétons auto-plaçants est due à l'incorporation d'adjuvants superplastifiants qui ont une fonction défloculante de la quantité importante (180 à 200 ℓ/m^3) des fines cimentaires ou minérales introduites dans le matériau. Les superplastifiants ont un rôle dispersif de ces fines, fluidifiant ainsi le mélange par abaissement important du seuil de cisaillement et de la viscosité. De ce fait, la vibration extérieure devient tout à fait inutile.

La phase mortier, ainsi fluidifiée et cohérente, va devenir le vecteur d'entraînement des plus gros éléments (gravillons) qui doivent s'écouler à la même vitesse que le mortier lui-même. Toute différence entre les vitesses d'écoulement du mortier et d'entraînement des gravillons est génératrice de ségrégation (dynamique). La ségrégation « statique », assimilable à une sédimentation, peut être obtenue par une viscosité minimale du mortier qui retiendra en suspension les gravillons dans le mélange, une fois « auto-serré ».

1.3.2 Essais usuels rhéologiques

Les essais développés pour ce type de béton [66] visent à définir son auto-plaçance et à détecter les incidents de comportement, tels que la ségrégation et le ressuage :

- appréciation de la mobilité du béton en milieu non confiné (essais d'étalement) ;
- évaluation de celle-ci en milieu confiné (essai au L-Box) ;
- prévision des défauts de stabilité (ségrégation et ressuage).

■ Mobilité en milieu non confiné : étalement sans secousse

L'essai d'étalement (*slump-flow*) est réalisé à partir d'un cône d'Abrams, sur une table carrée type DIN d'au moins 90 cm de côté.

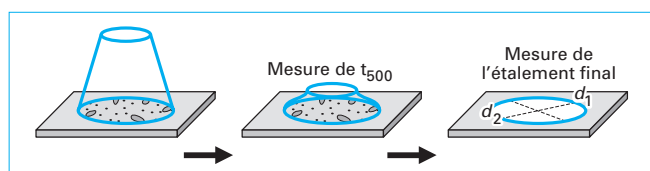


Figure 8 – Essai d'étalement sans secousse sur BAP

Aucune secousse ou vibration n'est appliquée. La mesure des diamètres d'étalement du matériau après démoulage est réalisée dans les conditions de la norme NF EN 12350-4 (figure 8). Est faite une mesure complémentaire (T_{500}) du temps mis pour que l'étalement du béton atteigne un cercle de 500 mm, tracé à partir du centre de la plaque. L'incertitude mesurée sur cet étalement est estimée à ± 30 mm, pour une plage de valeur de 500 à 700 mm.

■ Mobilité en milieu confiné : essai à la boîte en L (L Box)

L'essai de la boîte en L (L Box) permet de vérifier que le béton auto-plaçant pourra se mettre en place facilement (figure 9).

Dès la levée complète de la trappe, le béton stocké dans le réservoir vertical R s'écoule dans la cuve horizontale après avoir traversé une grille constituée par trois barres verticales. Après stabilisation du matériau, les altitudes h_1 et h_2 sont mesurées et le rapport de celles-ci (h_2/h_1) est considéré comme un indicateur de l'écoulement. Son incertitude de mesure est estimée à $\pm 0,10$ sur toutes les plages de valeurs. Un mauvais écoulement du béton à travers le ferrailage, et une accumulation de gravillons en aval de la grille, constituent des indicateurs de ségrégation et de risques de blocage.

■ Ségrégation : essai de stabilité au tamis

Cet essai praticable en laboratoire, ou sur chantier, évalue la stabilité du béton lors du coulage et son classement vis-à-vis du risque de ségrégation. Il vient compléter les observations relevées au cours des essais d'étalement et d'écoulement à la boîte en L.

Le principe consiste à verser une quantité définie de béton auto-plaçant sur un tamis de 5 mm^2 , et à déterminer la proportion de laitance traversant les mailles de ce tamis. L'indicateur (stabilité au tamis) est défini par le rapport de la masse de laitance à celle de l'échantillon initial, exprimé en pourcentage. L'incertitude de mesure sur la stabilité au tamis est estimée à $\pm 3 \%$ pour des valeurs inférieures à 15 %.

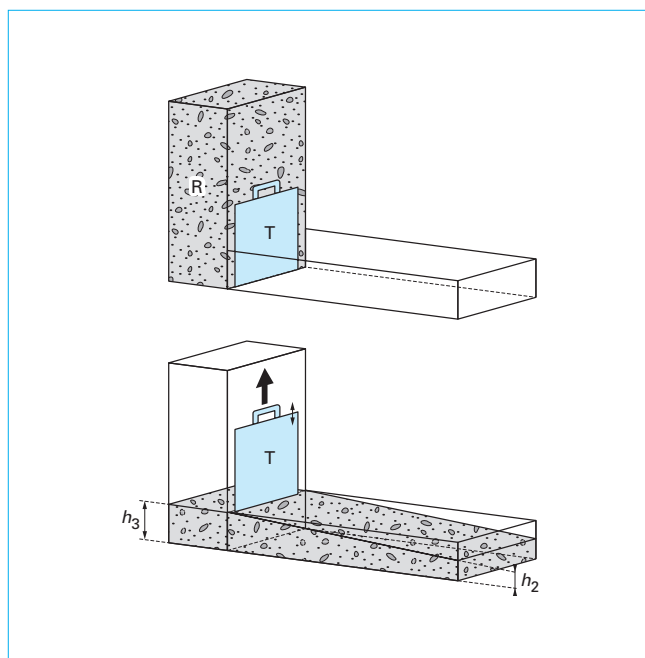


Figure 9 – Essai à la boîte en L

1.3.3 Classification des bétons auto-plaçants

La définition des critères de classification des bétons auto-plaçants s'appuie sur leurs niveaux d'emploi. Selon la configuration de la partie d'ouvrage, **un type de béton auto-plaçant est défini au travers des trois indicateurs suivants** (tableau 7) :

- intervalle d'écoulement ;
- le cheminement longitudinal ;
- l'épaisseur de la dalle, ou de la paroi.

À ces catégories correspondent des spécifications d'écoulement et de ségrégation (tableau 8).

Indépendamment de ces catégories, la fluidité est spécifiée en valeurs d'étalement (tableau 9).

Tableau 7 – Catégories de BAP

Tableau 7 – Catégories de BAP				
Cahier des charges		Applications horizontales		Applications verticales
Intervalle I d'écoulement (mm)	Cheminement C (mm)	Épaisseur < 30 cm	Épaisseur > 30 cm	
I > 100	C < 5	1	2a	2b
	5 < C < 10		2b	
80 < I < 100	C < 5	2a		
	5 < C < 10	2b		
I < 80	C < 5	3a		3b
	5 < C < 10	3b		

Tableau 8 – Spécifications générales d'écoulement et de ségrégation des BAP

Catégories	1	2a	2b	3a	3b
Valeur limite supérieure au tamis (%)	< 20		< 15		< 10
Écoulement au L-box	non spécifié	> 0,80			
		2 barres	3 barres	2 barres	3 barres

Tableau 9 – Classes d'étalement

Classes d'étalement	Valeur minimale (mm)	Valeur maximale (mm)
SF1	550	650
SF2	650	750
SF3	750	850

1.4 Incidents rhéologiques

Les incidents rhéologiques qui apparaissent sur chantier peuvent être soit :

- inhérents au béton, si celui-ci n'a pas été défini correctement pour répondre à toutes les spécifications du cahier des charges du chantier ;
- dus à des facteurs externes, non prévus par ce même cahier des charges.

Ces incidents rhéologiques vont se manifester principalement sous trois aspects :

- **perte importante de maniabilité** du matériau ;
- apparition de **ségrégation** ;
- **formation de ressuage** avant coulage, ou après mise en place du béton.

1.4.1 Perte de maniabilité

L'évolution de la maniabilité du béton frais peut évoluer de façon importante et sous l'effet de différents facteurs propres au chantier :

- augmentation du temps de transport entre la centrale de fabrication et le chantier et des attentes sur chantier (qui aggravent l'évaporation de l'eau de gâchage et la ségrégation de ses constituants pendant le brassage dans le camion transporteur) ;
- mauvais choix du groupe ciment (pour certains bétons), fines, adjuvant, eau libre, qui peut conduire à des conséquences brutales et dommageables pour la maniabilité, donc bien avant la fin de la mise en œuvre (stabilisation dans les bennes, blocage de pompe, impossibilité de vibrer le béton, ...) ;
- élévation de la température ambiante, un facteur aggravant l'évaporation et favorisant l'accroissement de la cinétique de prise du béton.

Pour conserver une maniabilité suffisante à la mise en œuvre, tous ces facteurs d'influence doivent donc être pris en compte et leurs **effets compensés, dès la préparation du chantier.**

■ Le **choix de la centrale de fabrication** se fait avec les critères suivants :

- **situation géographique de la centrale** par rapport au chantier, de façon à ce que la durée de transport reste la plus faible possible avec prise en compte des périodes de circulation difficile et de température. À 20 °C, la durée maximale de transport, coulage compris, devrait se situer en dessous de 1 heure et 30 minutes ;
- **capacité matérielle** de la centrale pour l'incorporation de plusieurs adjuvants (plastifiants, superplastifiants, entraîneurs d'air, retardateurs, ...) ;
- **capacité de malaxage** adaptée aux commandes de béton et présentant les équipements de brassage assurant une bonne dispersion des constituants ;
- **cadence de production** à définir pour éviter les longs arrêts de bétonnage, notamment dans le cas des bétons auto-plaçants.

■ Les **moyens de transport** sont adaptés pour :

- limiter au maximum l'évaporation pendant le transport (bennes à ouverture réduite) ;
- éviter tout risque de contamination pendant le transport et le déchargement ;
- brasser efficacement le matériau transporté (tambour comportant au moins deux vitesses de rotation).

■ La **composition du béton** est établie de façon à :

- pouvoir prendre en compte les aléas climatiques prévisibles pendant le déroulement du chantier (aléas de conditions ambiantes et de transports) ;
- éviter toutes les réactions parasites pouvant intervenir entre les adjuvants, le ciment, et les autres éléments fins.

■ Au niveau de la **mise en œuvre**, la commande du béton est passée de façon à limiter le plus possible les temps d'attente sur chantier, et les arrêts de bétonnage. Pour ce faire, elle prend en compte :

- les débits maximaux de coulage gravitaire ou de pompage ;
- les capacités réelles de serrage dans le coffrage ;
- l'incidence des intempéries prévisibles ;
- l'absence occasionnelle de matériels de secours.

1.4.2 Ségrégation

La ségrégation reste **un des problèmes majeurs des bétons**, qu'ils soient traditionnels, ou auto-plaçants.

Elle se manifeste par une séparation d'une phase solide du reste du matériau. Par exemple, les gros gravillons se séparent de la phase mortier du béton. Dans le cas des bétons courants, cette ségrégation peut se manifester localement sous l'effet de la vibration, ou de façon générale sous l'effet de la gravité. Pour les bétons auto-plaçants, un manque de viscosité peut provoquer soit :

- un mauvais entraînement des gros éléments par une phase mortier trop fluide au moment du coulage ;
- un effet comparable à une sédimentation, une fois le béton déféctueux mis en place. Ces deux effets risquent de co-exister dans les cas de bétons mal formulés.

Les conséquences d'une telle pathologie sont importantes, car elles affectent à terme les propriétés de structure. Il est donc primordial de contrôler, et de maîtriser, l'homogénéité du matériau lors de sa mise en place (figures 10 et 11).

La ségrégation due au matériau est systématiquement détectée au cours des essais précédents.



Figure 10 – Effets de la ségrégation sur le béton durci

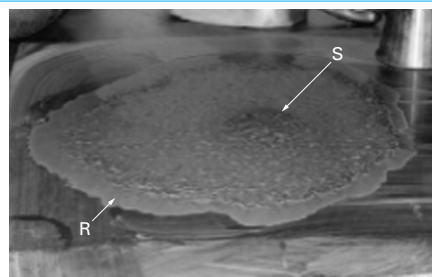
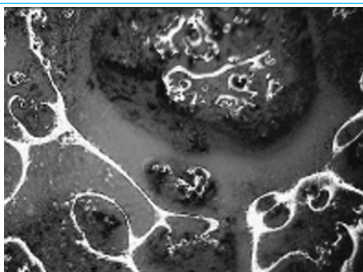


Figure 11 – Détection de la ségrégation (S) et du ressuage (R) à l'essai d'étalement



L'eau remonte en surface et peut désenrober les gravillons, provoquant des cas graves de tassements, de part et d'autre des armatures de peau. S'ensuit alors une fissuration dommageable pour la durabilité.

Figure 12 – Apparition de ressuage

1.4.3 Ressuage

Le ressuage est considéré comme une ségrégation de l'eau par rapport au reste du mélange. Il résulte souvent d'un tassement gravitaire progressif du béton avec expulsion de l'eau vers le haut (figure 12). Il est généralement dû à un déséquilibre entre l'eau et les fines en quantité trop faible, ou insuffisamment défloculées. Quelques remèdes traditionnels permettent de rétablir cet équilibre :

- changer les sables qui n'apportent pas assez d'éléments fins ;
- utiliser des agents défloculants plus efficaces, aussi bien au niveau du ciment, que des éléments du sable ou des additions minérales ;
- éventuellement baisser le dosage en eau libre (eau efficace), si cela est possible.

Le ressuage est souvent accentué par l'augmentation du temps de prise. Les faibles températures ayant tendance à accroître ce temps de prise, il sera nécessaire en hiver :

- de réduire les dosages en adjuvants (superplastifiants notamment) ;
- de diminuer la teneur en eau efficace ;
- et, si cela est possible, d'avoir recours à un agent de viscosité.

Au contraire, sous températures élevées ($> 25^{\circ}\text{C}$), il sera nécessaire de rechercher une adjuvantation plus efficace et un léger ajout d'eau, si cela reste possible. Il convient également de compenser l'évaporation plus forte, si le temps de transport est long (supérieur à 1 heure).

1.5 Effets de la température ambiante

L'élévation de la température ambiante ($> 25^{\circ}\text{C}$) peut influencer à deux niveaux :

- élévation de la température des constituants du béton avec modification de la cinétique de réaction immédiate pour les constituants actifs (ciment, eau, adjuvants et fines minérales) ;
- élévation de la température du mélange avec accélération des cinétiques de prise et de durcissement.

Ces effets peuvent être atténués, par exemple, par l'emploi d'un retardateur de prise, ou par l'application des dispositions prévues lors des bétonnages par temps chauds, sans oublier la compensation de l'eau d'évaporation pendant le transport.

Les fortes baisses de température ambiantes ($\Theta < 5^{\circ}\text{C}$) ont des effets inverses :

- les refroidissements variables des constituants (eau, adjuvants, éléments fins, gravillons) selon leurs modes respectifs de dosage, entraînent des perturbations importantes dans les réactions avec les adjuvants ;
- le refroidissement ralentit globalement les réactions de prise.

Ces effets peuvent être corrigés en travaillant sur le matériau à la fabrication par :

- une meilleure protection thermique des stockages des divers constituants ;

- une éventuelle baisse des dosages en adjuvants (superplastifiants) et en eau efficace, après vérification en laboratoire ;
- et, si nécessaire, l'application des dispositions prévues lors de bétonnages par temps froids.

1.5.1 Impacts sur les matériaux réactifs

Selon leurs modes de stockage, les constituants du béton sont plus ou moins exposés aux variations de température ambiante :

- la température du ciment stocké dans un silo fermé évoluera d'autant moins que sa quantité sera élevée ;
- les granulats évolueront davantage s'ils ne sont pas abrités et, dans le cas de températures extrêmes, il sera nécessaire d'adopter les dispositions prévues au dossier [C 2 230v2] ;
- les variations de la température de l'eau du réseau peuvent être importantes, mais ne sont pas brutales. Cependant, des écarts de quelques degrés de température de cette eau peuvent avoir des conséquences majeures sur la défloculation des éléments fins (cas d'emploi de superplastifiants) ;
- les adjuvants sont normalement stockés dans des locaux calorifugés et, donc, moins soumis aux aléas de températures. *A contrario*, dans le cas où les adjuvants sont stockés en petites quantités dans des fûts ou dans des locaux non protégés, les variations de température sont très sensibles et, dans de nombreux cas, l'adjuvant peut perdre toute efficacité.

1.5.2 Impacts sur la rhéologie initiale

L'action de la température est importante sur le comportement rhéologique du béton. À ce jour, le problème reste complexe et doit être traité en amont, en laboratoire, car la multiplicité des facteurs ne permet pas un traitement sur site. De plus, les simulations en laboratoire autorisent un examen rapide des multiples variations possibles :

- les effets des variations de température de chaque constituant sont liés à leur dosage et à leur nature ;
- les conséquences n'évoluent pas nécessairement de façon progressive avec la température ;
- l'action de certains adjuvants (superplastifiants) peut devenir sélective en fonction des températures différentes des constituants riches en éléments fins (ciments, additions, sables fillérisés, ajouts en poudre, ...).

■ Dans le cas d'emploi de superplastifiants ou de réducteurs d'eau, **les températures élevées** peuvent provoquer :

- une fluidification immédiate un peu plus élevée, mais qui s'atténue brutalement avec le temps ;
- une évaporation sensible pendant le transport, provoquant ainsi une chute du rapport E/C ;
- la perte d'eau générée par cette évaporation engendre des difficultés au coulage par gravité, peut rendre impossible le pompage, et perturbe les conditions de serrage ;
- le béton étant alors insuffisamment compacté, ses caractéristiques de durabilité et mécaniques sont fortement compromises.

■ Dans le cas d'emploi de superplastifiants ou de réducteurs d'eau, **les températures basses** peuvent provoquer :

- une inhibition de la défloculation des éléments fins ;
- une apparition de ressuage générant, à son tour, une ségrégation dommageable pour les caractéristiques mécaniques et pour la durabilité ;
- une perte de pompabilité.

1.5.3 Effets combinés de la température et des temps de transport

L'augmentation du temps de transport vient exacerber les inconvénients précédents, du fait du séjour prolongé dans la cuve du camion porteur. Dans les cas où ces situations sont incontournables, il conviendra de prévoir les dispositions recommandées au dossier [C 2 230v2], en intégrant éventuellement la dégradation des conditions d'accessibilité du chantier sous conditions hivernales.

1.5.4 Application aux bétons auto-plaçants

Les bétons auto-plaçants contiennent généralement de forts dosages en adjuvants superplastifiants, réducteurs d'eau et, parfois, en agents de viscosité. Les problèmes évoqués précédemment se trouvent donc exacerbés et il est indispensable de prévoir ceux-ci au niveau de l'étude de formulation du béton pour anticiper, sur des bases techniques validées, les modifications incontournables de dosages en adjuvants et en eau.

Dans certains cas extrêmes, la nature de l'adjuvant peut être changée et, à défaut de solution, le chantier suspendu.

D'une façon générale, le lecteur pourra également se reporter au dossier [77].

2. Prédiction de la résistance du béton dans l'ouvrage

2.1 Différentes méthodes

La bonne gestion des opérations de décoffrage des ouvrages en béton, de mise en tension des câbles de précontrainte, et de manutention des éléments préfabriqués (pour ne citer que ces exemples), nécessite une mesure fiable de la résistance du béton dans l'ouvrage.

2.1.1 Éprouvettes d'information

La méthode la plus couramment utilisée pour évaluer la résistance au jeune âge du béton dans l'ouvrage consiste à réaliser des éprouvettes d'information, conservées à proximité de l'ouvrage, et à les tester à la rupture en compression. L'écart sensible entre les historiques de températures, au sein des éprouvettes et au sein de l'ouvrage, génèrent cependant des différences notables sur la prise et le durcissement du béton, créant ainsi des écarts considérables de résistance entre les éprouvettes d'information et le béton dans l'ouvrage. Ces écarts peuvent être partiellement réduits par une maîtrise des conditions de conservation des éprouvettes, mais ceci suppose d'enregistrer en parallèle les températures dans les éprouvettes et dans l'ouvrage.

2.1.2 Éprouvettes asservies thermiquement

Pour réduire les écarts entre les bétons d'éprouvettes et ceux de l'ouvrage, les éprouvettes peuvent être conservées dans des capots chauffants asservis à la température de l'ouvrage. Cette technique est très employée dans le cas de traitement thermique. Mais, dans les cas courants, l'expérience montre qu'il n'est pas toujours possible d'obtenir des évolutions de températures superposables, du fait des délais de réaction et des à-coups de chauffage. La déficience du procédé tient à un asservissement unilatéral. Par temps froid, il n'y a pas de correction possible si la température dans l'ouvrage (cas des pièces minces) devient inférieure à celle des éprouvettes. Le capot joue alors, en effet, un rôle d'isolant sur les éprouvettes, ce qui conduit à surestimer la résistance dans l'ouvrage [61].

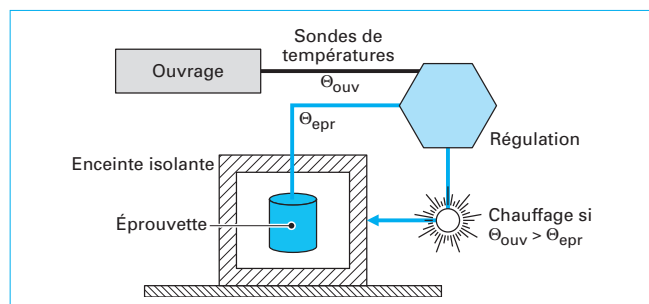


Figure 13 – Régulation de température par capots chauffants

2.1.3 Sclérométrie

On peut également mentionner la méthode de mesure de dureté de surface par sclérométrie. Son défaut principal réside dans le fait que la mesure est superficielle, alors que la résistance au jeune âge est requise au sein du béton (derrière les plaques d'ancrage de précontrainte, par exemple).

2.1.4 Appréciation de la maturité

La maturométrie consiste, à partir du suivi de la température au sein de l'ouvrage, à déterminer par calcul (au jeune âge) le degré d'avancement des réactions d'hydratation correspondant au durcissement du béton. Le concept de « maturité » permet de traduire l'état de mûrissement du béton, donc son niveau de durcissement. Il intègre les effets couplés de la température et du temps sur la cinétique de mûrissement du béton.

2.2 Maturométrie

D'après la loi de maturité : « deux bétons de même composition ayant même valeur de maturité auront même résistance, quelle que soit l'histoire de températures ayant conduit à cette valeur de maturité ».

Cette technique permet donc de connaître la résistance du béton *in situ*, à partir de la relation degré d'avancement/résistance (âge équivalent/résistance) déterminée par étalonnage pour une formulation de béton particulière.

2.2.1 Fondements de la méthode

La maturométrie s'appuie sur la dépendance de la résistance du béton avec son histoire thermique. La loi d'Arrhenius s'est révélée être la plus appropriée pour décrire la sensibilité de la vitesse de durcissement du béton à la température. Elle introduit un **paramètre unique, l'énergie d'activation apparente E_a** , qui traduit le degré de sensibilité du béton :

$$K(\Theta) = A \exp\left(-\frac{E_a}{R\Theta}\right)$$

avec A constante de proportionnalité, 1/s,
 R constante des gaz parfaits, 8,314 J/mol.K,
 E_a « énergie d'activation apparente » du béton, J/mol.

Un béton donné est caractérisé par son énergie d'activation apparente et sa courbe de référence (relation maturité/résistance). L'application de la loi d'Arrhenius permet alors de transformer un historique de température en une valeur de maturité d'où une résistance mécanique peut être déduite. L'âge équivalent correspond au temps durant lequel le béton doit être maintenu à la température de référence (en général 20 °C) afin d'obtenir la même valeur de maturité que dans les conditions de cure réelle. L'âge équivalent à 20 °C est calculé à chaque échéance de mesure de la température par la formule suivante :

$$t_{eq_n} = \sum_{i=1}^n \left\{ \exp \left[-\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{273 + \frac{\Theta_i + \Theta_{i-1}}{2}} - \frac{1}{293} \right) \right] (t_i - t_{i-1}) \right\}$$

avec t_i échéance de la mesure n° i,
 Θ_i température mesurée à l'échéance n° i (en °C),
 E_a énergie d'activation apparente du béton (dans l'exemple $E_a/R = 4\,000$ K),
 R constante des gaz parfaits ($R = 8,31$ J/K/mol).

Le tableau 10 mentionne les résultats du calcul précédent pour les 4 premières échéances.

Tableau 10 – Exemple de calcul de temps équivalent [51]

Données		Calculs				
Âge t_i (h)	Θ (°C)	$\Theta_{i\text{moy}}$ (K)	E	t_i (h)	$E \Delta t_i$ (h)	t_{eq} (h)
0	21	-	-	-	-	0
0,75	22	294,5	1,07	0,75	0,80	0,80
1,5	27	297,5	1,23		0,93	1,73
2,25	28	300,5	1,41		1,05	2,78
3	29	301,5	1,47		1,10	3,88

avec $\Theta_{i\text{moy}} = 273 + \frac{\Theta_i + \Theta_{i-1}}{2}$

$$E = \exp \left[-\frac{Ea}{R} \left(\frac{1}{\Theta_{i\text{moy}}} - \frac{1}{293} \right) \right]$$

$$\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$$

$$teq_i = teq_{i-1} + \exp \left[-\frac{Ea}{R} \left(\frac{1}{\Theta_{i\text{moy}}} - \frac{1}{293} \right) \right] \Delta t_i$$

Une fois calculé les âges équivalents teq_i correspondant à chaque échéance t_i de mesure de la température, l'âge équivalent correspondant à une échéance t_m de mesure de résistance, ou de chaleur, peut être calculé par interpolation :

- on cherche dans quel intervalle $[t_i; t_{i+1}]$ se situe l'échéance t_m ;
- on calcule l'âge équivalent teq_m correspondant à t_m :

$$teq_m = teq_i + (teq_{i+1} - teq_i) \frac{t_m - t_i}{t_{i+1} - t_i}$$

Le principe de la méthode maturométrique peut se schématiser comme sur la figure 14.

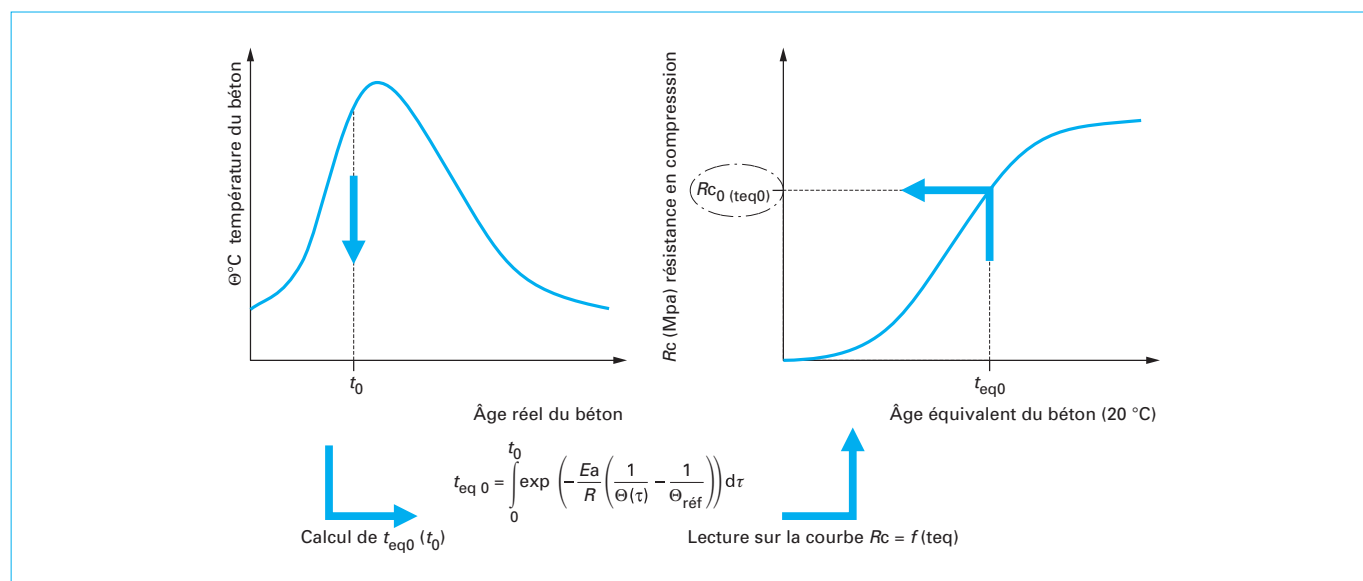
La courbe $Rc = f(teq)$, et Ea , sont déterminées à partir de mesures de résistance en compression (voire de chaleur pour Ea) dans une gamme de températures représentatives de celles du chantier (figure 14).

2.2.2 Avantages de la maturométrie

La méthode permet de traiter de façon plus fine l'évaluation de la résistance au jeune âge en définissant, par exemple, les points critiques de l'ouvrage. L'information est quasi-instantanée et ne nécessite pas de transporter des éprouvettes, de fixer ou d'organiser des échéances d'essais de rupture. Elle est également plus riche qu'un simple résultat d'essai de rupture puisque le délai nécessaire à l'obtention de la résistance requise peut facilement être prévu par extrapolation sur la courbe de température. Les données fournies permettent la vérification de la fiabilité des systèmes d'isolation, ou de chauffage *in situ*.

La maturométrie permet d'évaluer le délai d'obtention de résistances en compression au jeune âge supérieures ou égales à 5 MPa. En deçà de cette valeur, la précision de la mesure devient faible et l'utilisation de la maturométrie est déconseillée. Par ailleurs, on couvre habituellement des plages de résistance ne dépassant pas la moitié de la résistance à 28 jours.

Il faut noter que, dans le cas particulier de béton à longue période dormante (température faible ou retard lié à l'adjuvantation), la méthode reste applicable, mais peut perdre de son intérêt (résultats d'étalonnage dispersés conduisant à des prévisions parfois trop, pessimistes).



2.2.3 Chaîne de mesure

Les matériels nécessaires à la maturométrie doivent permettre les relevés de températures, leur stockage, et le calcul des âges équivalents (figure 15).

Les points critiques de l'ouvrage sont déterminés par le bureau d'étude en comparant les contraintes aux divers points de la structure et les maturités correspondantes aux instants sensibles (décoffrage, levage ou mise en précontrainte). Le nombre de sondes et leur position sont ensuite définis pour ces points critiques.

En fin d'essai de maturométrie, l'appareil doit fournir, pour chaque sonde installée dans l'ouvrage, les éléments suivants :

- l'évolution de la température de chaque sonde, soit sous forme d'un tableau, soit sous forme d'un graphique [$\theta\text{ }^{\circ}\text{C} = f(t)$];
- le calcul de l'âge équivalent pour chaque sonde ;
- la courbe de référence utilisée pour la prédiction de la résistance, si l'appareil le prévoit.

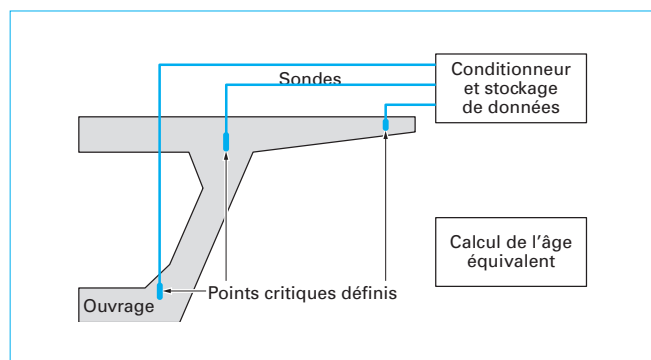


Figure 15 – Principe de mesure maturométrique

Si le maturomètre possède une fonction de prévision des résistances mécaniques, il doit permettre la saisie d'une courbe de référence expérimentale de la résistance mécanique en fonction de l'âge équivalent. Cette saisie peut être faite, soit sous forme de fonction mathématique paramétrable, soit sous forme de tableau de couples de valeurs (âge équivalent \leftrightarrow résistance mécanique). Avant toute opération de maturométrie, un dossier d'étalonnage du béton, précisant le coefficient d'activation apparent du béton, la courbe de référence, et l'implantation des sondes, doit être disponible.

2.3 Étalonnage préliminaire

Tout béton destiné à être suivi par maturométrie doit être « étalonné ». Cet étalonnage préalable consiste à déterminer l'énergie d'activation apparente du béton (E_a ou E_a/R sous forme réduite) et la courbe de référence donnant sa résistance à la compression simple en fonction de son âge équivalent [$R_c = f(te)$] (figure 16).

La détermination de l'énergie d'activation apparente et de la courbe de référence peuvent faire l'objet d'essais préliminaires en laboratoire. L'énergie d'activation, qui décrit la sensibilité du béton à la température, peut être déterminée en vérifiant qu'une formule de béton donnée, soumise à des historiques de température sensiblement différents, conduit à la même corrélation âge équivalent/résistance.

Cette différenciation est faite à partir de deux séries d'éprouvettes confectionnées d'une même charge, conservées, d'une part en ambiance extérieure (ou en laboratoire à $20\text{ }^{\circ}\text{C}$), et d'autre part en conditions quasi-adiabatiques (caisse calorifugée), puis testées à la rupture en compression à différentes échéances, avec relevé concomitant de leur historique de température. Les deux courbes construites sont ajustées par modification de l'énergie d'activation, suivant la méthode de superposition. Ces courbes resserrées conduisent alors à un fuseau dont la limite inférieure est considérée comme la courbe d'étalonnage.

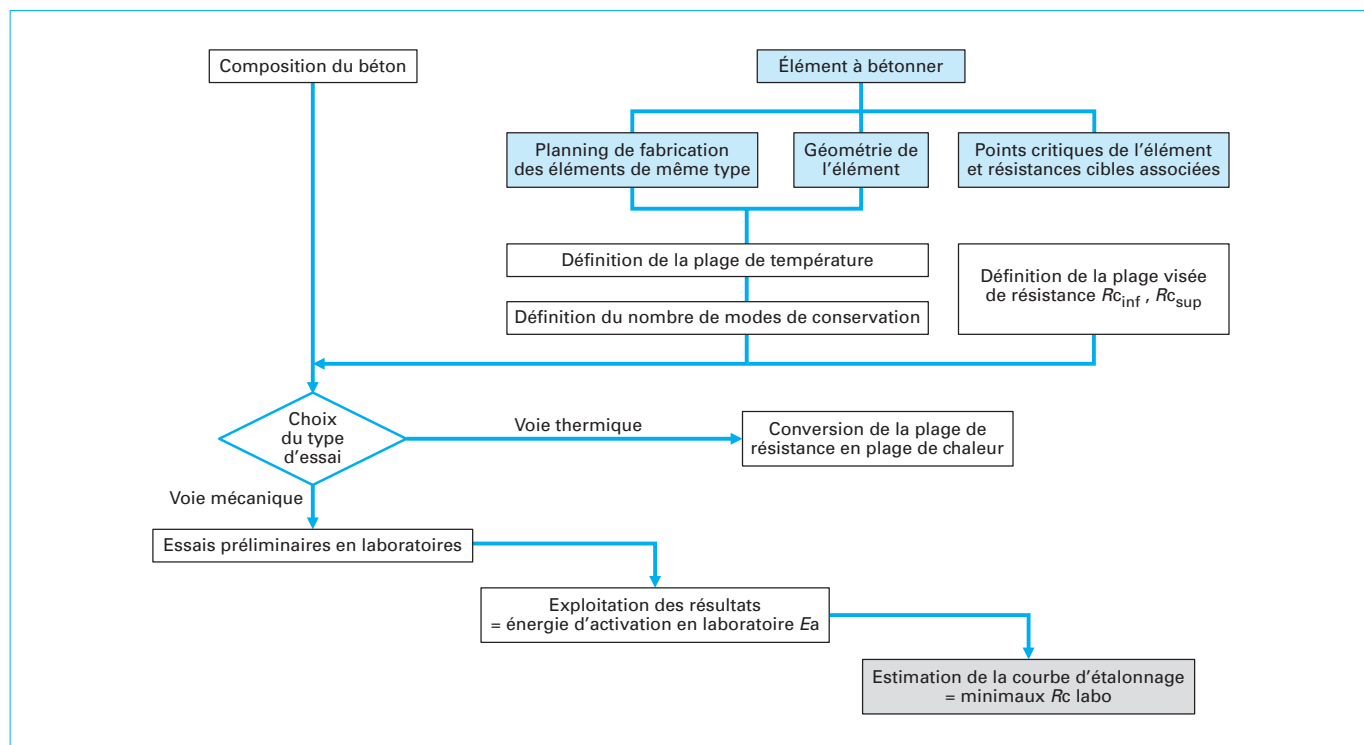


Figure 16 – Vue d'ensemble de la procédure d'étalonnage préliminaire en laboratoire

Dans les cas courants, l'étalonnage consiste à déterminer l'énergie d'activation apparente E_a du béton, ainsi que la courbe d'étalonnage $R_c = f(\text{teg})$. Les résultats ne sont valides que sur des domaines de température et de résistance limités qui dépendent de ceux couverts au cours de l'étalonnage. La courbe d'étalonnage deviendra la courbe de référence après les contrôles de conformité initiaux réalisés sur chantier.

2.3.1 Plage visée de résistances

Quelle que soit la voie expérimentale choisie, mécanique ou thermique, pour déterminer l'énergie d'activation apparente du béton, la démarche a vocation d'estimer la résistance du béton aux points critiques précédemment définis pour chaque élément. Les valeurs de résistance R_{ci} requises, appelées valeurs « cibles », sont communiquées par le bureau d'études. La plage visée [R_{cinf} ; R_{csup}] lors de l'étalonnage est élargie de 5 Mpa autour des valeurs extrêmes données par le bureau d'étude ; cette plage est intitulée « plage visée de résistances ». En règle générale, il est préférable que la valeur maximale de cette plage n'excède pas la moitié de la valeur de la résistance du béton à 28 jours (figure 16).

2.3.2 Méthodes expérimentales d'étalonnage préliminaire

Les méthodes expérimentales décrites ci-après fournissent la valeur de l'énergie d'activation apparente et, éventuellement, la courbe d'étalonnage du béton lors d'un étalonnage préliminaire en laboratoire. Ces premiers résultats ne seront définitifs qu'après intégration des résultats des essais d'étalonnage sur chantier. Mais, ils permettent d'avoir une première approche de l'énergie d'activation apparente et de la courbe d'étalonnage du béton, et peuvent s'avérer utiles pour effectuer des simulations avant chantier [51].

Pour l'énergie d'activation apparente, et dans le cas présent d'un étalonnage préliminaire en laboratoire, ces caractéristiques peuvent être de deux types :

- la résistance en compression (voie mécanique) ;
- la chaleur produite (voie thermique).

Pour la courbe d'étalonnage, l'obtention de données mécaniques est, dans tous les cas, indispensable.

2.3.3 Voie mécanique

Pour la voie mécanique, la maturité est suivie par l'intermédiaire de la résistance en compression du béton. Cette méthode présente l'avantage, par rapport à la voie thermique, de mener en une seule opération la détermination de l'énergie d'activation apparente et de la courbe d'étalonnage du béton ; l'objectif étant obtenir des courbes de montée en résistance pour différentes histoires thermiques du béton. Le domaine de résistance à étudier est la « plage visée de résistances ».

■ Méthode d'essai

Le béton doit être fabriqué en respectant sa composition et les temps d'attente évalués pour la mise en œuvre sur site. Le type des éprouvettes et la nature du moule doivent être les mêmes que ceux utilisés pour les contrôles du chantier.

De façon indicative, la couverture de la plage de résistance à 20 °C correspond, en général, à une échéance par période d'une ou deux heures, sauf dans le cas de bétons très rapides (montée en résistance supérieure à 5 MPa/h) pour lesquels la fréquence est augmentée à une échéance par demi-heure environ. Ces fréquences sont ensuite adaptées en fonction de la valeur prévue pour l'énergie d'activation apparente de la formule et du niveau de température de l'histoire thermique imposée. Le plan expérimental comporte, en général, un minimum de 20 éprouvettes par mode de conservation, et doit prévoir, au minimum, deux modes de conservation conduisant à imposer aux éprouvettes deux histoires thermiques dont l'enveloppe doit contenir les courbes de température des points sensibles de l'ouvrage.

Un écart de l'ordre de 10 °C doit intervenir le plus tôt possible entre les histoires thermiques du béton des deux modes de conservation extrêmes. Dans le cas particulier de bétons à période dormante longue (bétons adjuvantes, ...), cette différenciation des histoires thermiques du béton doit avoir lieu impérativement moins de deux heures après le gâchage. L'écart de 10 °C environ doit ensuite se maintenir au moins jusqu'aux maximums des courbes de température, lorsque les conditions ne sont pas isothermes.

Les températures du cœur des éprouvettes sont enregistrées dès la fin de la confection et pour chacun des modes de conservation. L'écart maximal de température entre deux éprouvettes placées dans un même mode de conservation ne doit pas excéder 2 °C. Les éprouvettes doivent être conservées dans leurs moules, même au-delà de 24 heures, jusqu'à leur préparation avant mesure.

■ Exploitation des résultats

L'exploitation des résultats, faite par la méthode de superposition, permet d'avoir une première estimation de la courbe d'étalonnage et de l'énergie d'activation apparente du béton. Le cas des bétons à période dormante longue doit être distingué de celui des bétons courants.

Les résultats se présentent sous la forme de couples d'enregistrements :

- valeurs de résistance en compression à différentes échéances ;
- courbe de température correspondante.

Dans la méthode de superposition :

- l'énergie d'activation est d'abord fixée à une valeur initiale de façon à pouvoir calculer l'âge équivalent du béton à chacune des échéances d'essais mécaniques des différentes histoires thermiques ;
- puis, les différentes courbes donnant la résistance en fonction de l'âge équivalent sont figurées pour les différentes histoires thermiques sur un même graphe ;
- et enfin, une recherche de réduction d'écart entre les courbes est entreprise en faisant varier l'énergie d'activation.

La valeur recherchée de l'énergie d'activation apparente est celle minimisant l'écart entre les courbes sur la plage visée de résistances (méthode des moindres carrés, par exemple). La courbe enveloppe inférieure du fuseau de courbes expérimentales constitue l'estimation recherchée de la courbe d'étalonnage.

Dans le cas des bétons à période dormante longue, le paramètre « âge t^* », correspondant approximativement à la fin de la période dormante, doit être intégré pour chacune des histoires thermiques en plus des résultats du type de ceux obtenus pour les bétons courants (enregistrement de résistance et de température au cours du temps). On ne considère alors que les mesures effectuées, pour chacune des histoires thermiques, au-delà de l'âge t^* correspondant. Les âges de ces mesures sont ensuite diminués de la valeur t^* (décalage de l'origine des temps). On exploite ensuite ces données comme dans le cas des bétons courants.

2.3.4 Voie thermique

Dans ce cas, c'est le suivi de la maturité par l'intermédiaire de la chaleur dégagée par le béton en cours de durcissement qui est considéré pour la détermination de l'énergie d'activation apparente. On cherche donc à obtenir des courbes de dégagement de chaleur pour différentes histoires thermiques du béton. Pour la construction de la courbe d'étalonnage, des essais mécaniques complémentaires peuvent être effectués en laboratoire.

■ Essais calorimétriques pour la détermination de l'énergie d'activation apparente

Ce sont des essais calorimétriques effectués sur béton, ou sur mortier de béton équivalent (MBE). Le calorimètre est isotherme, semi-adiabatique, ou adiabatique :

- **isotherme** : l'échantillon est placé dans une ambiance régulée qui assure en son sein une température homogène et constante au cours du temps ;

– **semi-adiabatique** : l'échantillon est placé dans une enceinte l'isolant partiellement de son environnement d'un point de vue thermique ;

– **adiabatique** : l'échantillon est, du point de vue thermique, complètement isolé de son environnement de façon à ce que le flux de chaleur traversant sa surface soit constamment nul.

Selon la géométrie de la partie concernée de l'ouvrage à construire, on pourra préférer :

- la calorimétrie isotherme pour une pièce fine (20 cm ou moins) ;
- la calorimétrie semi-adiabatique pour une pièce moyenne (autour de 40 cm (de plus petite dimension)) ;
- la calorimétrie adiabatique pour une pièce massive (> 60 cm (de plus petite dimension)).

■ Aspects particuliers des techniques calorimétriques

Pour les trois techniques citées, l'élévation de température ($\Delta\Theta$) du béton en cours de durcissement est proportionnelle à la différence entre la chaleur produite par l'hydratation (Q_h) et la chaleur fournie au milieu environnant, ou chaleur perdue, (Q_p). Le facteur de proportionnalité est la capacité thermique (C^{th}) du béton :

$$C^{th} \Delta\Theta = Q_h - Q_p$$

C^{th} est exprimée en J/g/K ; $\Delta\Theta$ en K et Q_h et Q_p en J/g.

Exprimée en flux de chaleur (Θ), cette relation devient :

$$C^{th} \left(\frac{\delta\Theta}{\delta t} \right) = \Theta_h - \Theta_p$$

avec $\left(\frac{\delta\Theta}{\delta t} \right)$ dérivée de la température (en K/h),
 Θ_h et Θ_p flux (dérivées) associés aux quantités de chaleur Q_h et Q_p (en J/g/h).

■ Calorimétrie isotherme

On mesure ici le flux de chaleur (Θ_h) dégagée par l'éprouvette, égal au flux (Θ_p) absorbé par l'environnement pour maintenir constante la température de l'éprouvette :

$$\Theta = \text{constante} \Rightarrow \left(\frac{\delta\Theta}{\delta t} \right) = 0 \Rightarrow \Theta_h = \Theta_p$$

La quantité de chaleur (Q_h) dégagée par l'éprouvette est obtenue par intégration du flux.

Les éprouvettes doivent être de taille moyenne pour assurer leur représentativité et garantir un profil quasi isotherme dans la section. Pour toute température d'essai comprise dans la plage utile du calorimètre, la température de l'éprouvette doit rester constante ($\pm 2^\circ\text{C}$ près) pendant toute la durée de l'essai, dans une plage de température allant de 5 à 50 °C. Pour obtenir la précision souhaitée, les mesures de flux ne doivent pas être séparées de plus de 15 à 20 minutes.

■ Calorimétrie semi-adiabatique

On mesure ici la température de l'éprouvette. La quantité de chaleur (Q_h) dégagée par l'éprouvette est calculée en sommant la quantité de chaleur accumulée dans l'éprouvette et la chaleur absorbée par le milieu environnant. La première est proportionnelle à l'élévation de température de l'éprouvette, la seconde est mesurée par fluxmétrie ou calculée en fonction de l'écart de température entre l'éprouvette et le milieu environnant :

$$Q_h = C^{th} \Delta\Theta + Q_p = C^{th} [\Theta - \Theta(0)] + Q_p$$

Le milieu environnant doit être régulé à la température initiale prévue pour l'essai. En l'absence d'information sur ce sujet, on admettra que les coefficients d'échange du calorimètre (généralement étalonné pour une température d'ambiance de 20 °C) sont également valables quelle que soit la température d'ambiance au moment de l'essai. Pour obtenir la précision souhaitée, les mesures de température ne doivent pas être séparées de plus de 15 à 20 minutes.

■ Calorimétrie adiabatique

On mesure ici la température de l'éprouvette. La quantité de chaleur dégagée par l'éprouvette est proportionnelle à l'élévation de température de l'éprouvette :

$$Q_p = 0, \text{ donc } Q_h = C^{th} \Delta\Theta$$

Le flux gagné ou perdu par l'éprouvette doit être limité de façon à garantir une dérive en température inférieure à 0,2 °C/jour, environ, pour une éprouvette inerte chauffée à 60 °C. En outre, pour obtenir la précision souhaitée, les mesures de température ne doivent pas être séparées de plus de 15 à 20 minutes.

■ Aspects communs aux différentes techniques calorimétriques

La plage de chaleur à couvrir, lors des essais calorimétriques, est celle correspondant à la plage visée de résistances. En pratique, les enregistrements de chaleur commencent immédiatement après la gâchée et se poursuivent jusqu'à avoir atteint la valeur Q_{sup} donnée par la formule suivante :

$$Q_{sup} = Q(\infty) \left(0,16 + 0,88 \frac{Rc_{sup}}{Rc28} \right)$$

avec $Q(\infty)$ chaleur théorique dégagée à un temps infini (obtenue par extrapolation ou, à défaut, prise égale à 3,5 fois la valeur de Q au point d'inflexion de la courbe de chaleur (par exemple au point de dérivée maximum),
 Rc_{sup} borne supérieure de la plage visée de résistance définie au paragraphe 2.3.1,
 $Rc28$ résistance à 28 jours du béton.

■ Méthode d'essai

Le béton testé est fabriqué en respectant scrupuleusement la formule prévue sur chantier. Si les essais sont effectués sur mortier de béton équivalent, la construction de la formule correspondante à partir de la formule utilisée sur chantier, et la fabrication du mortier, doivent suivre les recommandations spécifiques à cette méthode. Les matériaux sont conservés à la température nécessaire pour le béton ou le mortier confectionné, soit à une température égale, à $\pm 2^\circ\text{C}$ près, à celle du calorimètre.

Le nombre d'éprouvettes testées pour chaque histoire thermique est choisi de façon à obtenir, sur la valeur de la chaleur mesurée, un intervalle de confiance (à 95 %) d'au maximum $\pm 10\%$ relatifs (valeur moyenne sur la durée de l'essai).

Le plan expérimental doit prévoir au moins deux températures de fabrication du matériau à imposer aux éprouvettes des histoires thermiques différentes, dont l'enveloppe contient les courbes de température des points sensibles de l'ouvrage pendant 48 heures au moins. Toutefois, dans le cas d'essais isothermes, si les histoires thermiques des points sensibles dépassent 50 °C, la température de l'essai sera limitée à cette valeur. Pour chaque histoire thermique, les conditions de conservation doivent permettre d'assurer une bonne homogénéité de la température dans chaque éprouvette.

Pour appréhender les effets de la température sur la cinétique de la période dormante du béton ou du mortier, il est recommandé d'avoir, immédiatement après gâchée, au moins 10 °C d'écart entre les histoires thermiques extrêmes. La température du béton doit être enregistrée au cœur de l'éprouvette dès la mise en place dans le calorimètre et avec une précision inférieure à 0,5 °C.

■ Exploitation des résultats

Deux méthodes d'exploitation sont évoquées dans la partie théorique : la méthode dite « des vitesses » et celle dite « de superposition ».

On retiendra que la méthode des vitesses est essentiellement un outil d'analyse et qu'en pratique la méthode la plus utilisée pour déterminer l'énergie d'activation apparente est la méthode de superposition.

La méthode des vitesses vient parfois compléter la méthode de superposition en confirmant la valeur obtenue, ou en expliquant une mauvaise qualité de superposition des courbes par une forte variation de E_a en fonction de la chaleur dégagée, ou bien encore en révélant, le cas échéant, la nécessité d'utiliser un doublet d'énergies d'activation apparentes...

Il est donc le plus souvent intéressant d'appliquer les deux méthodes. Elles sont présentées ci-après en distinguant, comme précédemment, les bétons classiques, des bétons à longue période dormante.

Pour les bétons courants, les résultats se présentent là aussi sous la forme de couples d'enregistrements (autant qu'il y a d'histoires thermiques différentes) :

- courbe de chaleur en fonction de l'âge du béton ou du mortier ;
- courbe de température correspondante.

• Méthode des vitesses

Pour appliquer cette méthode, il faut calculer la dérivée de la courbe de chaleur aux différentes échéances d'enregistrement. On peut calculer ces valeurs dérivées par différentes méthodes :

- pente de la corde ;
- pente d'une droite de régression glissante sur $2n+1$ points (du $n^{\text{ème}}$ point avant le point considéré, au $n^{\text{ème}}$ point après, n supérieur ou égal à 1) ;
- pente de la parabole passant par le point considéré, le point précédent et le point suivant...

Une fois calculée la dérivée aux différentes échéances de mesure, on construit la courbe E_a en fonction de Q . La valeur de l'énergie d'activation recherchée se calcule alors en effectuant la moyenne des valeurs de $E_a = f(Q)$ sur un intervalle $[Q_{\text{inf}}^v ; Q_{\text{sup}}]$.

Pour Q_{inf}^v , on prendra une valeur égale à 10 % de la valeur finale Q_{∞} . La valeur à prendre pour Q_{sup} est celle calculée comme précédemment.

Toutefois, si la courbe $E_a = f(Q)$ est manifestement trop irrégulière sur l'intervalle considéré (amplitude de variation supérieure à 10 kJ/mol), le choix d'une valeur moyenne de E_a peut ne plus être pertinent.

• Méthode de superposition

L'application de cette méthode se fait comme pour l'exploitation de données mécaniques, en cherchant la valeur de E_a minimisant, sur l'intervalle de chaleur $[Q_{\text{inf}} ; Q_{\text{sup}}]$, l'écart entre les courbes donnant la chaleur en fonction de l'âge équivalent. La borne supérieure Q_{sup} est celle calculée comme précédemment. La borne inférieure Q_{inf} se calcule de la même façon en remplaçant la valeur R_{sup} de la borne supérieure de la plage de résistances visée par la valeur R_{cinf} de la borne inférieure de la même plage définie :

$$Q_{\text{inf}} = Q_{\infty} \left(0,16 + 0,88 \frac{R_{\text{cinf}}}{R_{\text{c28}}} \right)$$

Dans le cas des bétons à période dormante longue, le processus est identique à celui employé pour l'exploitation des données mécaniques en ne considérant que les résultats des mesures effectuées après l'âge t^* , et en procédant à un décalage de l'origine des temps en retranchant, pour chaque histoire thermique, la valeur t^* aux échéances de mesure. Les deux méthodes précédentes, vitesse et superposition, s'appliquent ensuite aux données obtenues. La distinction entre période dormante et jeune âge ne modifie pas le calcul des valeurs $E_a(Q)$ dans la méthode des vitesses, mais peut permettre d'améliorer la superposition des courbes en fonction de l'âge équivalent.

■ Essais mécaniques pour l'estimation de la courbe d'étalonnage du béton

Les résultats d'essais calorimétriques d'étalonnage en laboratoire ne permettent de déterminer que la valeur de l'énergie d'activation apparente du béton. Si l'on souhaite, lors de cette étape préliminaire, avoir une estimation de la courbe d'étalonnage du béton, des essais mécaniques complémentaires doivent être réalisés sur, au moins, une histoire thermique.

Pour chaque échéance de mesure de la résistance, l'âge réel du béton est transformé en âge équivalent à 20 °C à l'aide de la loi d'Arrhénius et en utilisant la valeur de E_a préalablement déterminée. La courbe de résistance en fonction de l'âge équivalent constitue une première estimation de la courbe d'étalonnage du béton. Ces résultats seront exploités conjointement avec les résultats de l'étalonnage sur chantier pour déterminer la courbe de référence du béton.

3. Suivi de la maturité du béton dans l'ouvrage

3.1 Préparation du chantier

Si le maturomètre prévu pour le chantier possède une fonction de prévision des résistances mécaniques du béton aux jeunes âges, il doit également permettre la saisie d'une courbe de référence fournissant la résistance mécanique en fonction de l'âge équivalent et obtenue expérimentalement (phase d'étalonnage chantier) [52] et [61].

Avant toute opération de maturométrie, l'utilisateur doit disposer d'un dossier d'étalonnage du béton précisant le coefficient d'activation apparent du béton et la courbe de référence, ainsi que la prévision de positionnement des sondes de relevés de températures et de leur protection sur site. L'appareil utilisé doit fournir au minimum :

- l'évolution de la température en fonction de l'âge pour chaque sonde installée dans l'ouvrage et le calcul de l'âge équivalent ;
- la courbe de référence utilisée pour la prévision de la résistance.

3.2 Étalonnage

La méthode expérimentale permet d'acquérir la valeur de l'énergie d'activation apparente et la courbe d'étalonnage du béton sur chantier. Ces données se présentent sous la forme du suivi dans le temps de la résistance en compression du béton placé dans différentes conditions de conservation.

Le béton testé au cours de l'étalonnage doit être représentatif de celui qui sera mis en œuvre dans l'ouvrage. Cette représentativité concerne également la plage de températures au cours du mûrissement. Ces plages peuvent éventuellement être estimées à partir de simulations thermiques en utilisant des valeurs approchées pour l'énergie d'activation apparente. Il est nécessaire, en particulier, de suivre le développement des résistances du béton pour deux histoires thermiques distinctes. L'exploitation réalisée par la méthode de superposition concerne les résultats de l'étalonnage sur chantier, et éventuellement ceux obtenus au cours d'un étalonnage préliminaire en laboratoire.

Dans le cas où un étalonnage préliminaire a eu lieu, on procède en une, deux, ou trois phases, décrites ci-après, et en l'absence d'étalonnage préliminaire, on passe directement à la troisième phase.

■ Dans la première phase, l'ensemble des résistances mesurées est reporté graphiquement en fonction de l'âge équivalent, calculé à l'aide de l'énergie d'activation apparente déterminée en laboratoire ($E_{a\text{labo}}$).

Si la qualité de superposition est jugée satisfaisante, la courbe d'étalonnage à retenir est la courbe enveloppe inférieure du fuseau de l'ensemble des courbes expérimentales, et la valeur de E_a est égale à $E_{a\text{labo}}$. Si la qualité de superposition n'est pas satisfaisante, on passe à l'étape suivante.

■ **Lors de la seconde phase**, la valeur de $E_{a\text{labo}}$ obtenue auparavant n'est plus prise en compte et une nouvelle valeur d'énergie d'activation apparente : $E_{a\text{labo}}/\text{chantier}$ est déterminée à partir des résultats mécaniques de laboratoire et de chantier.

Si la qualité de superposition est jugée satisfaisante, la courbe d'étalonnage à retenir est la courbe enveloppe inférieure du fuseau des courbes expérimentales, la valeur de E_a étant $E_{a\text{labo}}/\text{chantier}$. Si la qualité de superposition n'est toujours pas satisfaisante, ou si aucun résultat mécanique n'est disponible de l'étalonnage préliminaire en laboratoire, on passe à la phase 3.

■ **Dans la troisième phase**, seuls les résultats issus du « chantier » sont exploités. L'énergie d'activation apparente et la courbe d'éta-

lonnage obtenues permettent d'estimer l'évolution de la résistance du béton dans l'ouvrage, sur la base de suivis thermiques réalisés aux points critiques.

Cette estimation n'est fiable que si la résistance estimée se situe à l'intérieur de la plage visée de résistances, et si la courbe de température du béton dans l'ouvrage, sur laquelle se base l'estimation, reste à l'intérieur du fuseau des températures suivies au cours de l'étalonnage. Il reste cependant possible d'accepter des sorties ponctuelles du fuseau dans la limite de $\pm 5^\circ\text{C}$.

Le logigramme de la figure 17 traite les différents niveaux d'exploitation des résultats d'essais, avec la distinction à apporter entre la période dormante et le jeune âge.

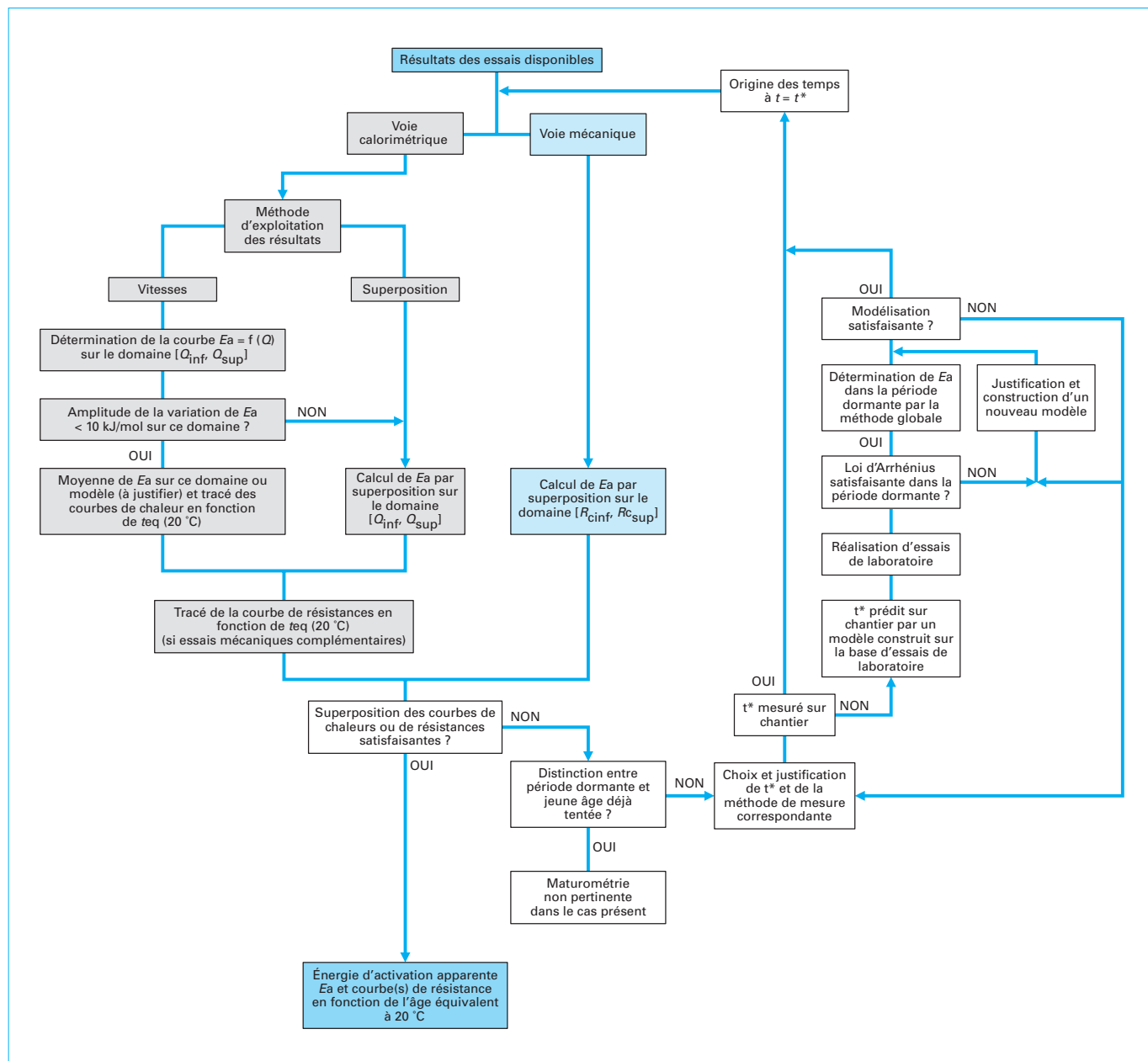


Figure 17 – Logigramme d'exploitation des résultats d'essais

3.3 Suivi de la maturité

Le béton utilisé sur chantier ne doit pas présenter de différences maturométriques significatives (énergie d'activation et courbe d'étalonnage) avec le béton étudié en amont.

3.3.1 Contrôle de conformité

Ce contrôle consiste à comparer aux mêmes échéances les résistances à la rupture en compression simple, et les estimations fournies par le maturomètre. Il faut s'assurer que sur toute la durée du chantier :

- la composition du béton ne varie pas par rapport à celle du béton étalonné, même si les conditions climatiques changent ;
- le mode de production du béton n'évolue pas (séquence de malaxage, mode d'introduction des adjuvants, etc.).

Cependant, la fabrication du béton intègre un certain nombre d'éléments variables dont il faut s'assurer de leur influence faible. La maturométrie seule ne peut pas détecter un changement de composition, et un **contrôle systématique des bons de pesée reste indispensable**.

■ Les **contrôles de conformité initiaux** (figure 18) viennent compléter la courbe d'étalonnage du béton pour aboutir à sa courbe de référence. En cours de chantier, ils permettent d'assurer que les variations de production ne conduisent pas à des écarts significatifs entre le béton fabriqué et le béton étalonné pour des histoires thermiques du béton comprises dans le fuseau d'étalonnage. Ils permettent également la correction de l'énergie d'activation et/ou la courbe de référence, si les histoires thermiques des éprouvettes ne se situent pas dans le fuseau des histoires thermiques d'étalonnage.

Les six premiers contrôles de conformité sont faits en début de chantier et étalés sur une période minimale de 3 semaines. Si l'entreprise apporte des garanties de régularité de production des constituants du béton, en particulier du ciment (résistance au jeune âge, demande en eau), ce délai pourra être réduit, sans toutefois être inférieur à 2 semaines. Nous sommes alors dans le cas des contrôles de conformité initiaux.

À noter que, dans cette phase, la maturométrie ne peut pas encore remplacer les éventuelles éprouvettes d'information.

■ Au-delà, il s'agit de **contrôles de conformité « en cours de chantier »** qui peuvent être utilisés pour remplacer les éprouvettes d'information. Ils se réalisent un jour de bétonnage sur chantier. En aucune manière, il ne devra y avoir une production particulière de béton pour la réalisation de ces essais.

On effectue donc un prélèvement de béton (soit en centrale, soit avant sa mise en place) sur celui qui est destiné à être suivi par maturométrie sur chantier. Ce prélèvement doit être tel qu'il permette la réalisation d'au moins :

- pour un contrôle de conformité initial : 19 éprouvettes (cylindres ou cubes) suivant le mode de contrôle de la résistance à la compression retenue par le chantier. Une éprouvette sera instrumentée avec un maturomètre, les 18 autres seront destinées à des mesures de résistances à la compression à 6 échéances différentes ;
- pour un contrôle de conformité en cours de chantier : une éprouvette instrumentée avec un maturomètre, et 9 autres destinées à des mesures de résistance à la compression à 3 échéances différentes.

Les échantillons doivent être conservés dans les mêmes conditions à l'extérieur (avec une isolation thermique pour le suivi de pièces massives, et sans isolation pour des pièces minces) pour se retrouver dans des conditions climatiques proches de celles du chantier.

Les échéances d'essais de rupture mécanique sont choisies de façon à être réparties dans la plage de résistance visée. Ce choix peut être guidé par les indications prédictives fournies par le maturomètre.

■ **À chaque contrôle de conformité, un récapitulatif de résultat est établi** en indiquant :

- les références des bons de pesée de la production sur laquelle le prélèvement a été effectué ;
- les mesures d'affaissement effectuées sur béton frais ;
- les heures des trois, ou six échéances d'essais de rupture mécanique ;
- les âges réels du béton à chaque échéance ;
- les âges équivalents indiqués par le maturomètre à chaque échéance ;
- la résistance à la compression estimée par le maturomètre à chaque échéance ;
- les résistances réelles de rupture à la compression déterminées à chaque échéance ;
- l'écart en MPa, entre la moyenne des résistances mesurées par rupture et celle indiquée par le maturomètre ;
- un graphique présentant l'évolution de la température avec l'âge et les courbes enveloppes des suivis thermiques des essais qui ont permis l'établissement de la courbe d'étalonnage et de référence du béton.

3.3.2 Exploitation des résultats

Selon qu'il s'agit d'un contrôle de conformité initial, ou en cours de chantier, l'exploitation des résultats ne se fera pas de la même manière.

Tant que les 6 contrôles de conformité initiaux ne sont pas terminés, la courbe de référence du béton n'est pas considérée établie, et il n'est donc pas encore possible d'avoir une réponse fiable sur l'instant de décoffrage.

Ces 6 contrôles de conformité initiaux réalisés, les résultats obtenus sont ajoutés à ceux qui ont servi pour l'établissement de la courbe d'étalonnage du béton. L'ensemble de ces résistances à la compression est exprimé sous forme de fuseau en fonction de l'âge équivalent à 20 °C, calculé sur la base de l'énergie d'activation apparente issue de l'étalonnage. Les fuseaux de l'ensemble des histoires thermiques en fonction des âges réels suivies lors des essais d'étalonnage, d'une part, et pendant les contrôles de conformité initiaux, d'autre part, sont également établis.

Deux situations sont alors possibles :

- soit la largeur du fuseau de résistance est faible (qualité de la superposition satisfaisante), la courbe de référence du béton est alors définie comme la courbe enveloppe inférieure du fuseau des résistances à la compression, et l'énergie d'activation du béton est celle issue de l'étalonnage ;
- soit la qualité de superposition ne convient pas, il faut déterminer si l'énergie d'activation d'étalonnage peut être remise en cause.

Pour cela, le fuseau de températures des essais utilisés pour la courbe d'étalonnage est comparé avec celui des 6 contrôles de conformité initiaux :

- si le fuseau de l'étalonnage contient celui des contrôles de conformité, la mauvaise qualité de superposition des résistances des contrôles de conformité initiaux et des résultats d'étalonnage traduit vraisemblablement un écart de fabrication entre les bétons testés lors des deux étapes. Il faut alors réagir au niveau de la production du béton et relancer de nouveaux contrôles de conformité initiaux ;
- si le fuseau d'étalonnage ne contient pas celui des contrôles de conformité, cet écart peut expliquer la mauvaise qualité de superposition des résistances. L'énergie d'activation issue de l'étalonnage est alors abandonnée, et une nouvelle énergie d'activation, qui permette de superposer au mieux les résultats de l'étalonnage et des contrôles de conformité initiaux, est recherchée.

La courbe de référence est alors définie comme la courbe inférieure du fuseau des résistances à la compression exprimées en fonction du temps équivalent à 20 °C, calculé sur la base de cette nouvelle énergie d'activation.

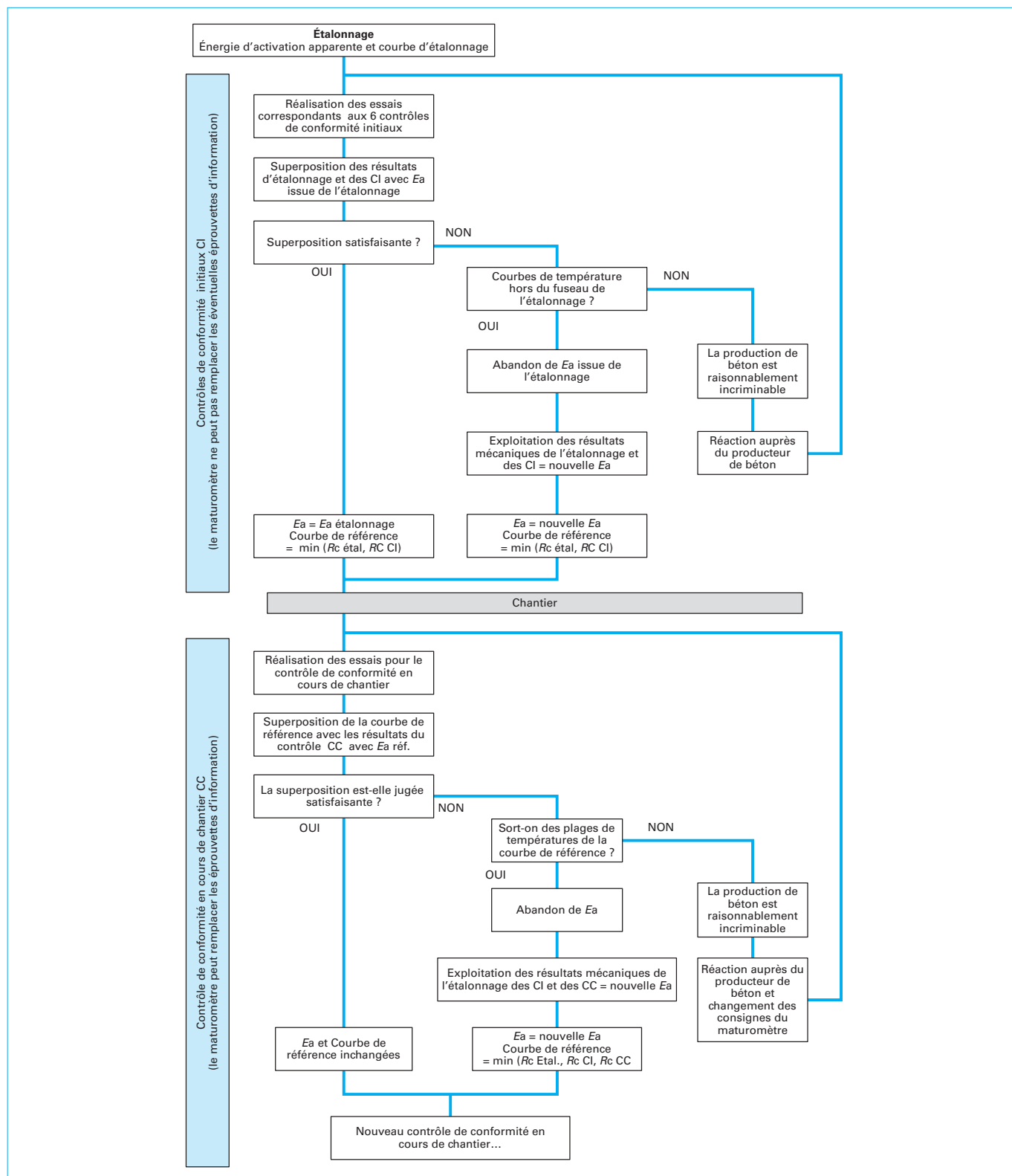


Figure 18 – Logigramme d'un contrôle de conformité

3.3.3 Cas d'un contrôle de conformité en cours de chantier

Trois situations peuvent se présenter selon la valeur des écarts entre les estimations du maturomètre et les valeurs mesurées par rupture sur éprouvettes :

- soit les écarts entre estimations et valeurs mesurées ne dépassent pas 2 MPa, et les variations observées sont acceptables et les écarts « réduits » ;

- soit le maturomètre sous-estime de plus de 2 MPa la valeur mesurée, et les écarts ne sont plus considérés comme réduits, mais sont dans le sens de la sécurité. Il n'est pas utile de modifier la courbe de référence, mais il peut s'avérer intéressant d'identifier l'origine de ces écarts pour, éventuellement, optimiser le cycle de coffrage / décoffrage par une nouvelle courbe de référence du béton ;

- soit le maturomètre surestime de plus de 2 MPa la valeur mesurée, et les écarts vont dans le sens de l'insécurité. Il convient alors de vérifier si le suivi thermique de ce contrôle s'intègre dans le fuseau enveloppe des suivis thermiques des essais de référence (étalonnage et contrôles de conformité initiaux).

Si le suivi thermique du contrôle s'intègre correctement, l'écart constaté sur les résistances traduit une différence de fabrication entre le béton testé et celui de la courbe de référence.

Un changement accidentel constaté dans la formulation ou le mode de production nécessite un nouveau contrôle de conformité, après élimination de la cause d'erreur en centrale de fabrication. Dans le même temps, les consignes de décoffrage du chantier seront changées en augmentant la résistance cible.

3.3.4 Suivi thermique du contrôle sortant du fuseau

La courbe de référence et l'énergie d'activation ne sont plus adaptées aux conditions de mûrissement du béton. Il faut retraiter les données de ce contrôle et celles des essais ayant servi à l'établissement de la courbe de référence et de l'énergie d'activation.

Si après leur retraitement, les résultats de ce contrôle présentent encore trop d'écart avec la nouvelle courbe de référence (écart > 2 MPa), cela signifie que le béton n'est plus comparable à celui utilisé pour les premiers essais.