

# Influence de la maturité au décoffrage et de l'ouvrabilité du béton sur la teinte des parements

Laurent NACHBAUR  
Laëtitia D'ALOÏA  
Robert LE ROY

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

## RÉSUMÉ

Le problème de la qualité des parements en béton englobe plusieurs types de défauts, dont les causes nombreuses proviennent de la formulation ou de la mise en œuvre. L'influence de l'ouvrabilité et de la maturité au décoffrage sur la teinte des parements a été étudiée. Ce travail a été réalisé en laboratoire, ce qui a permis un bon contrôle de la composition du béton comme des conditions de mise en œuvre. La teinte des parements a été caractérisée à l'aide d'un colorimètre, par mesure de la luminance.

Il apparaît que la teinte des parements dépend de la maturité au décoffrage. En revanche, les différences de maturité à la surface d'un même élément n'engendrent pas d'écarts sensibles de teinte, même pour des corps d'épreuve simulés de géométrie complexe. L'influence de l'ouvrabilité du béton a une influence mineure avec les conditions expérimentales retenues.

DOMAINE : Ouvrages d'art.

## ABSTRACT

### INFLUENCE OF BOTH MATURITY UPON FORMWORK REMOVAL AND CONCRETE WORKABILITY ON CLADDING HUE

*The problem of concrete cladding quality encompasses several types of flaws, whose multiple causes stem from either mix design or placing. The influence of both workability and the maturity upon formwork removal on cladding hue has been studied herein. This research was conducted in the laboratory, which allowed for a high level of control over the concrete composition as well as over placement conditions. Cladding hue was characterized using a colorimeter, by means of luminance measurements.*

*It would appear that cladding hue depends on maturity at the time of formwork removal. Differences in the level of maturity at the surface of a given element however do not engender significant alterations in hue, even for simulated complex-geometry specimens. The influence of concrete workability remains minimal under the given set of experimental conditions.*

FIELD: Structural engineering.

## Introduction

Les résultats présentés ici font partie d'un ensemble de travaux portant sur l'influence de certains paramètres de formulation et de mise en œuvre sur la qualité des parements et la durabilité du béton, sur la base des formules de béton et des méthodes de mise en œuvre du viaduc de Verrières (près de Millau (Aveyron) sur l'autoroute A75).

Cet article est consacré à la partie de l'étude traitant de l'influence de la maturité au décoffrage et de l'ouvrabilité du béton sur la qualité des parements, du point de vue de la teinte et de son homogénéité. Des essais de durabilité sont en cours, en vue de déterminer si la maturité au décoffrage influence également ces propriétés du béton.

La maîtrise de la qualité des parements est un sujet complexe qui recouvre en fait une série de problèmes. Il y a tout d'abord le problème de la définition claire de l'objectif à atteindre, les définitions utilisées étant encore trop souvent susceptibles d'interprétations contradictoires (« parement clair », par exemple). Ce premier problème est indissociable de celui de la caractérisation objective de la qualité des parements, qui n'est pas résolue de façon satisfaisante, la perception humaine étant toujours impliquée dans cette caractérisation [1, 2, 3]. Le second problème est que de très nombreux facteurs interviennent dans la qualité des parements, à tous les stades de la réalisation : conception, formulation du béton, préparation des coffrages, mise en place, etc. C'est à certains d'entre eux que nous nous sommes intéressés dans ce travail.

Devant le nombre de paramètres à prendre en compte, nous avons entrepris une étude de laboratoire, indispensable vis-à-vis des objectifs de maîtrise de ces paramètres. On ne s'intéresse ici qu'à deux d'entre eux : maturité au décoffrage et ouvrabilité du béton. Dans la mesure du possible, les autres paramètres ayant une influence ont été maîtrisés et, même, optimisés (une seule gâchée par corps d'épreuve, faible réemploi des coffrages, etc.). La méthode de caractérisation retenue permet quant à elle d'avoir une appréciation objective et quantitative, indépendante de l'opérateur. Il ne s'agit pas de la seule méthode permettant de caractériser les parements de façon objective.

## Matériaux, méthodes

### Matériaux

Les matériaux utilisés pour cette étude sont ceux du viaduc de Verrières (à l'exception de l'eau). Ils ont été fournis par l'AIOA 75, sauf le superplastifiant qui a été fourni par le fabricant :

- ciment : CPA-CEM I 52,5 PM ES CP2 « HTS » Le Teil, Lafarge ;
- sable : Rascalat 0/3 ;
- gravillon 1 : Rascalat 3/10 ;
- gravillon 2 : Rascalat 10/20 ;
- superplastifiant : Glenium 27, MBT ;
- eau : réseau.

Les courbes granulométriques des gravillons et du sable sont présentées sur la figure 1.

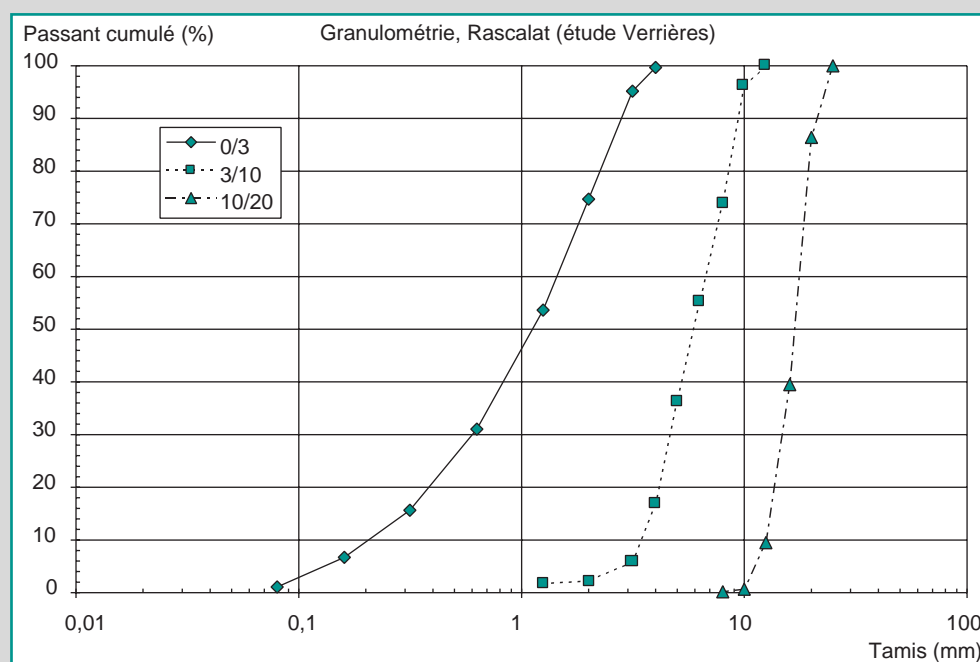


Fig. 1 - Granulométries moyennes des granulats utilisés lors de l'étude.

### Formule de béton. Conditions de mise en œuvre

La formule de référence (tableau I) utilisée est celle des piles du viaduc de Verrières.

Le béton a été mis en place en deux couches de même épaisseur, à l'aide de pelles manuelles, avec vibration en deux points par couche, pendant 15 s pour chaque point de vibration. La température ambiante était réglée à  $20 \pm 1$  °C et l'humidité relative à  $60 \pm 5$  %.

Deux séries de corps d'épreuve ont été réalisées pour déterminer l'influence :

- de la variation de la maturité au décoffrage avec la formule de référence ;

➤ de l'ouvrabilité du béton avec des formules dérivées décoffrées à une même maturité. Les variations qui ont été retenues sont : + 5 % et – 5 % en superplastifiant, + 5 l, – 5 l et – 10 litres en eau.

**TABLEAU I**  
**Formule de référence, avec des granulats secs**

Ciment (kg/m <sup>3</sup> )	420
Sable (kg/m <sup>3</sup> )	920
Gravillon 3/10 (kg/m <sup>3</sup> )	305
Gravillon 10/20 (kg/m <sup>3</sup> )	585
Superplastifiant (kg/m <sup>3</sup> )	4,2
Eau efficace (kg/m <sup>3</sup> )	148

## Matériel

### *Fabrication et mise en œuvre*

Le béton a été préparé par gâchées de 80 l, dans un malaxeur SKAKO COUVROT MTV 125 d'une capacité de 85 litres.

### *Moules*

Les corps d'épreuve utilisés pour cette étude étaient des parallélépipèdes, de dimensions  $h = 74$  cm,  $L = 38$  cm,  $e = 20$  cm, soit un volume de 56 l environ. Cette forme et ce volume ont été choisis pour obtenir un compromis entre une taille suffisamment importante pour être représentative d'un élément réel (du point de vue du volume de béton et de la surface de parement) et, suffisamment petite, pour être mise en œuvre aisément en laboratoire.

Les moules ont été réalisés en contreplaqué bakélinisé. Un élément a été coulé dans un moule calorifugé, dont les parois avaient été recouvertes (à l'extérieur) de plaques de polystyrène expansé de cinq centimètres d'épaisseur.

Pour chaque corps d'épreuve, trois sondes de mesure (thermocouples) ont été installées (fig. 2), une au cœur de l'échantillon (point d), une au milieu de la face, à un centimètre de profondeur (point a), une en haut de la face, à un centimètre de profondeur et cinq centimètres du haut de l'échantillon, au milieu de la largeur (point b).

### *Décoffrage*

Le décoffrage a été effectué lorsque le temps équivalent calculé pour la sonde placée au milieu de la face (point a) a atteint la valeur retenue. Pour les corps d'épreuve réalisés avec les formules dérivées, le temps équivalent visé était le même pour tous les éléments. On voit dans le tableau II que le temps équivalent au décoffrage varie néanmoins légèrement d'un corps d'épreuve à l'autre. Ces écarts sont dus essentiellement à la précision des mesures, en particulier au pas d'acquisition en temps (dix minutes).

Le temps équivalent pris comme référence pour la suite de l'étude est celui mesuré au milieu de la face.

## Méthodes de caractérisation

### *Maturométrie*

La maturométrie est présentée dans le guide sur la maturométrie [4]. L'énergie d'activation a été déterminée par la méthode de superposition d'après les résultats de mesures adiabatiques sur la formule nominale du béton. La méthode a été appliquée pour des taux variant de 10 à 43 % d'hydrata-

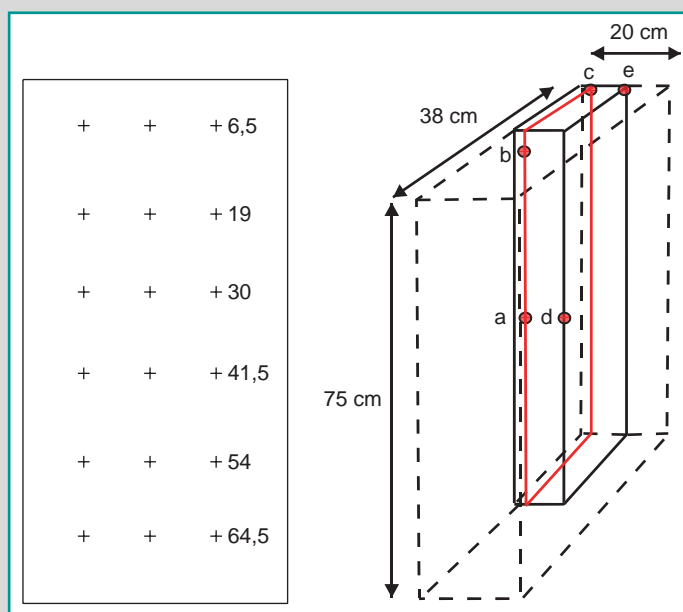


Fig. 2 - À gauche, schéma du corps d'épreuve et position des sondes de mesure de température (a, b et d) et des points pour lesquels ont été calculés degré d'avancement, âge équivalent et résistance lors des simulations. À droite, position des points de mesure de la luminance sur la face des corps d'épreuve. Hauteur totale : 75 cm, largeur 38 cm. Les valeurs indiquées sur la figure de gauche correspondent à la distance par rapport à la surface supérieure, en centimètres.

TABLEAU IIA

Température initiale du béton, affaissement, durée réelle de coffrage, temps équivalent et résistance mécanique estimée (calculée par la méthode de la maturométrie) pour chacun des points de mesure (haut de la face, milieu de la face, cœur) pour les corps d'épreuve réalisés avec les formules dérivées décoffrées à même maturité

Formule	Numéro du corps d'épreuve	Température initiale du béton (°C)	Affais-sement (cm)	Temps équivalent au décoffrage (h)			Temps réel (h)	R <sub>c</sub> au décoffrage estimée (MPa)		
				Haut	Milieu	Cœur		Haut	Milieu	Cœur
Nominale	1	22,1	20,4	11,3	11,9	12,3	9,9	7,6	8,8	9,6
+ 5 L E	2	22,1	20,5	10,5	11,2	11,5	9,5	6,0	7,4	7,9
- 5 L E	3	22,5	18,6	10,5	11,3	11,3	9,3	6,0	7,5	7,6
- 10 L E	4	22,5	16	10,7	11,2	11,5	9,4	6,4	7,4	8,1
+ 5 % Sp	5	22,3	18	11,2	11,8	11,9	9,8	7,4	8,6	8,8
- 5 % Sp	6	22,5	16,5	10,6	11,1	11,4	9,3	6,3	7,2	7,8

TABLEAU IIB

Température initiale du béton, affaissement, durée réelle de coffrage, temps équivalent et résistance mécanique estimée (calculée par la méthode de la maturométrie) pour chacun des points de mesure (haut de la face, milieu de la face, cœur) pour les corps d'épreuve réalisés avec la formule nominale décoffrée à des maturités différentes

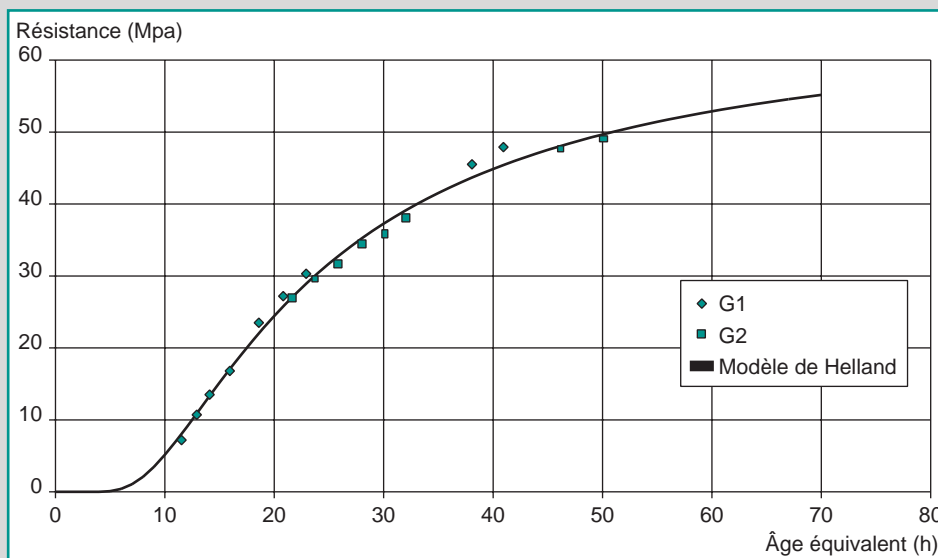
Condition de coffrage	Numéro du corps d'épreuve	Température initiale du béton (°C)	Affais-sement (cm)	Temps équivalent au décoffrage (h)			Temps réel (h)	R <sub>c</sub> au décoffrage estimée (MPa)		
				Haut	Milieu	Cœur		Haut	Milieu	Cœur
Non isolé	7	20,5	23	9,6	10,4	10,4	9,3	4,5	5,9	5,8
Non isolé	8	20,5	22	10,1	11,7	11,6	10,4	7,2	8,4	8,3
Non isolé	9	20	23	12,6	13,7	13,6	11,3	10,3	12,5	12,2
Non isolé	10	21,1	21,5	20,4	23,3	24,1	15,2	25,0	29,5	30,5
Isolé	11	23,5	20,8	11,8	12,3	12,2	9,1	8,6	9,7	9,5

tion. L'énergie d'activation déterminée ainsi est de  $34,9 \text{ kJ.mol}^{-1}$ , ce qui correspond à  $E_a/R = 4\,205 \text{ K}$ .

La courbe de référence  $R_c = f(t_{eq})$  a été établie pour la formule nominale d'après les valeurs moyennes des résistances mesurées sur trois éprouvettes cylindriques  $11 \times 22 \text{ cm}$ . Au total, deux gâchées ont été utilisées. Les résultats sont présentés sur la figure 3. Les valeurs ont été ajustées par le modèle mathématique suivant :  $R_c = a.\exp(-(b/t)^c)$ , avec :

- $a = 66,125$  ;
- $b = 19,9284$  ;
- $c = 1,3594$ .

On a fait l'hypothèse simplificatrice que les formules dérivées étaient caractérisées par la même courbe de référence et la même énergie d'activation que la formule de référence.



*Fig. 3 - Courbe de référence pour le béton de piles. Le modèle est tracé avec les valeurs numériques indiquées ci-dessus. Les mesures ont été effectuées à partir de deux gâchées (G1 et G2), en assurant un recouvrement des échéances de mesure.*

## Simulations

L'évolution des températures et des degrés d'avancement dans les corps d'épreuve a été simulée à l'aide du code de calcul CÉSAR-LCPC [5]. La courbe de dégagement de chaleur et l'énergie d'activation utilisées comme données des simulations sont celles déterminées en conditions adiabatiques sur la formule nominale.

Ces simulations ont été réalisées pour deux raisons. Elles permettent, d'une part de déterminer les champs de température et, donc, de calculer l'avancement sur l'ensemble des corps d'épreuve, alors que les résultats expérimentaux ne concernent qu'un nombre nécessairement limité de points de mesure. Ensuite, elles permettent une estimation de ces mêmes champs de température et d'avancement pour des corps d'épreuve de géométrie plus complexe.

## Colorimétrie

Les mesures ont été effectuées avec un colorimètre Minolta CR 231. La tête de mesure utilise une illumination à  $45^\circ$  et un angle d'observation de  $0^\circ$ . La source de lumière de type D65 (considérée comme représentative de la lumière du jour) étant intégrée à l'appareil, cette caractérisation est indépendante de la lumière ambiante. Les résultats sont exprimés sous forme d'un triplet  $Y \times x \times y$ , correspondant à l'univers CIE (Commission internationale de l'éclairage) [6]. Les valeurs  $x$  et  $y$  sont les coordonnées de chromaticité du diagramme  $xy$  CIE. La valeur  $Y$  est un facteur de luminance exprimé en pourcentage, fondé sur une réflexion parfaite de 100 %. Il s'agit d'une grandeur mesurée sur l'ensemble du spectre visible et dont le calcul prend en compte la réponse de l'œil humain. Elle

correspond bien à la sensation clair/sombre : une valeur  $Y = 0$  correspond à un corps noir parfait, une valeur  $Y = 100$  à un corps blanc.

Dans cette étude nous n'avons considéré que la luminance ( $Y$ ) lors des mesures sur parement. Les hétérogénéités de chromaticité ne sont donc pas prises en compte. Les valeurs de luminance, comprises entre 0 et 100, peuvent être comparées à l'échelle de gris du fascicule de documentation P 18-503 [3], annexe B. Cette échelle de gris distingue sept niveaux, numérotés de 1 (le plus clair) à 7 (le plus sombre). Les valeurs de luminance mesurées sur les niveaux de gris de ce fascicule sont indiquées dans le tableau III.

Les valeurs de ce tableau, résultats d'une mesure unique par niveau de gris, sont approchées. En effet, en faisant dix mesures sur un même niveau de gris, réparties sur l'ensemble de la surface, on observe une variation de  $Y$ . Les résultats des mesures effectuées sur les niveaux 3 et 4 de l'échelle de gris, dont nous allons voir qu'ils sont les plus représentatifs des parements étudiés ici, sont indiqués dans le tableau IV.

Pour chaque corps d'épreuve, la luminance a été mesurée à deux échéances après le décoffrage : deux et cinq semaines. Entre le décoffrage et la mesure, les corps d'épreuve ont été conservés dans une salle climatisée à 20 °C et 50 % HR. Les échéances exactes des mesures ont légèrement varié d'un échantillon à l'autre.

Les mesures ont été effectuées sur les deux grandes faces de chaque corps d'épreuve, selon la répartition présentée sur la figure 2.

Des photographies des deux faces de chaque corps d'épreuve ont été faites. Il s'agit de tirages papier couleurs. Certaines de ces images ont ensuite été numérisées, puis converties en noir et blanc avec le logiciel Adobe Photoshop. Les prises de vues ont été réalisées en intérieur, en éclairant les objets avec une puis deux rampes de lampes photo éclairant la surface à environ 45°. Les positions de l'appareil, des lampes et du corps d'épreuve étaient les mêmes à chaque prise de vue. Toutes les photos ont été réalisées le même jour. À cette échéance, l'âge des corps d'épreuve était de un à quatre mois. Ces prises de vue ne correspondent donc pas directement aux mesures colorimétriques.

**TABLEAU III**

**Valeurs de luminance pour les différents niveaux de gris du fascicule de documentation P 18-503  
(une mesure pour chaque niveau de gris)**

Numéro dans l'échelle de gris	1	2	3	4	5	6	7
Y	73	56	44	36	23	15	9

**TABLEAU IV**

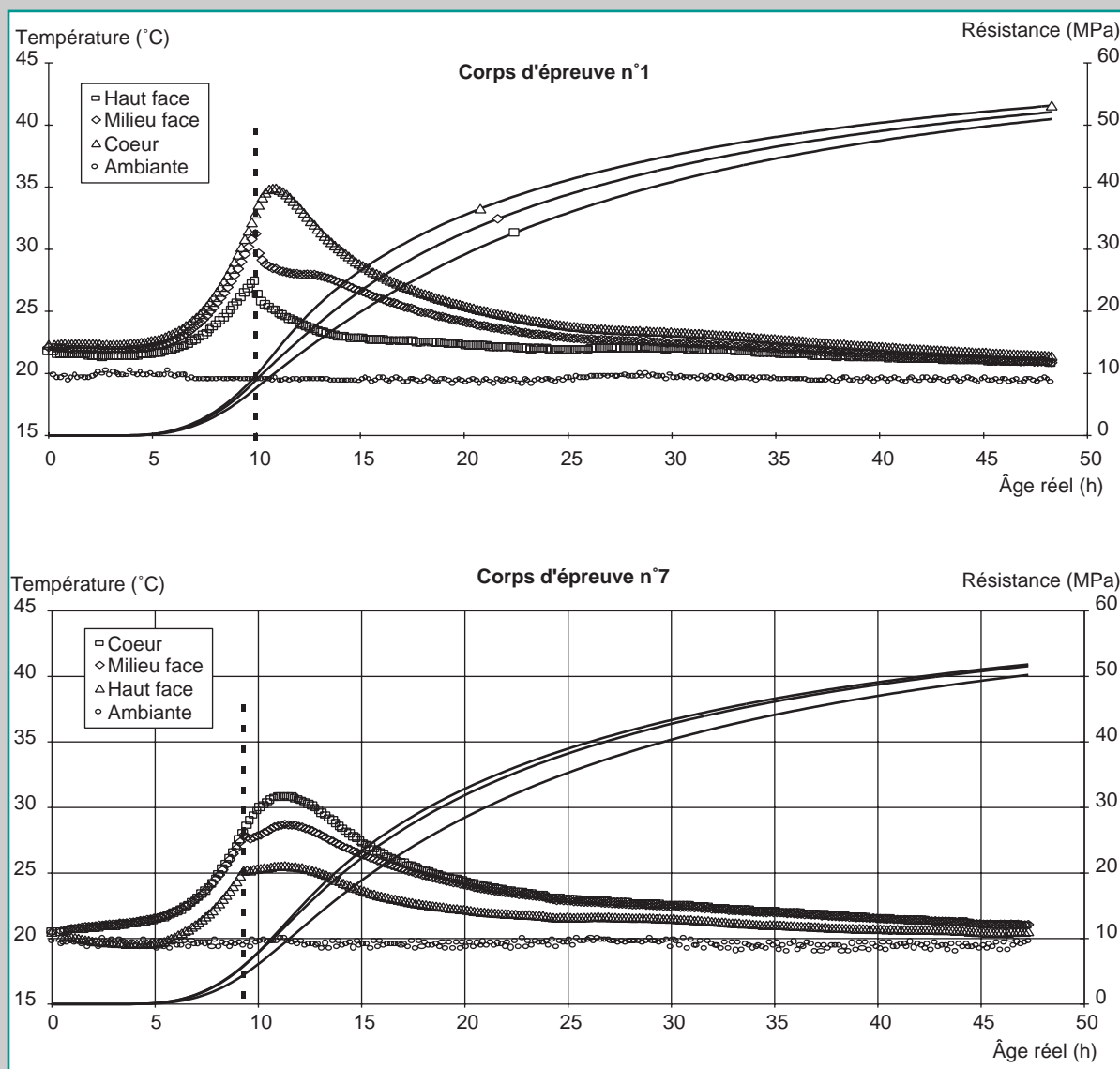
**Résultat de dix mesures de luminance sur les niveaux 3 et 4 de l'échelle de gris du fascicule P 18-503  
(même exemplaire que pour le tableau 3), réparties sur l'ensemble de la surface**

Niveau de gris	Moyenne	Minimum	Maximum	Écart-type
3	44,3	42,8	45,9	0,99
4	35,4	34,5	36,1	0,42

## Résultats

### Évolution des températures dans les corps d'épreuve

Les évolutions du degré d'avancement résultant des simulations, ou des résistances, calculées à partir des températures enregistrées par les trois sondes (fig. 4) montrent clairement que l'hydratation ne progresse pas à la même vitesse en tous points du corps d'épreuve (ce qui était de toutes façons assez évident *a priori*).



**Fig. 4 - Évolution de la température dans certains des corps d'épreuve, et évolution de la résistance en compression calculée d'après l'histoire thermique. Seuls les corps d'épreuve les plus représentatifs sont présentés ici.**

Ces graphiques présentent les enregistrements de température dans les corps d'épreuve en fonction du temps (âge réel depuis la mise en place dans le coffrage). Tous ces graphiques ont la même forme : ils comportent sept courbes, quatre pour des enregistrements de température (avec symboles), trois pour les résistances mécaniques calculées (traits pleins identiques pour les trois courbes). Les températures sont celles mesurées au cœur de l'élément, en milieu de face, en haut de la face, ainsi que la température ambiante. Les résistances correspondantes ont été calculées à partir de la courbe de référence. Les trois courbes de résistance ne sont pas distinguées les unes des autres mais il est facile de les repérer : la résistance augmente plus rapidement quand la température est plus élevée, c'est-à-dire à cœur. Le moment du décoffrage est repéré par une ligne pointillée verticale.

### **Influence de la maturité au décoffrage sur la luminance**

Les résultats des mesures colorimétriques effectuées sur des corps d'épreuve coulés avec la formule nominale et décoffrés à des maturités différentes sont présentés sur la figure 5. Il apparaît clairement que la maturité au décoffrage influe sur la luminance des parements. On n'observe pas d'évolution systématique entre les deux mesures (à deux et cinq semaines après le décoffrage). L'évolution observée entre les décoffrages à 10 et 14 heures de temps équivalent est très supérieure à l'écart mesuré entre les deux faces d'un même bloc. Sur l'ensemble des mesures effectuées, les valeurs



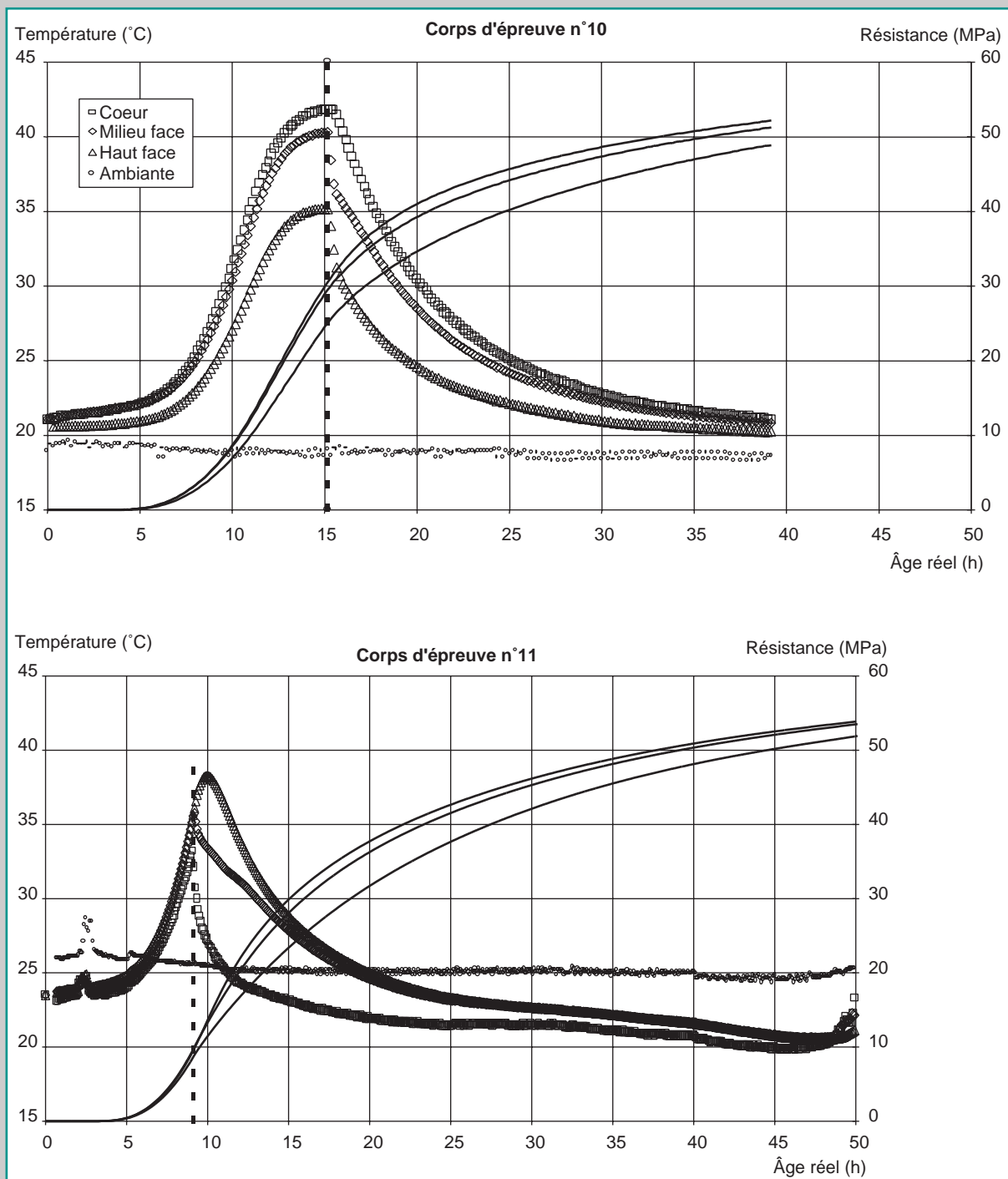
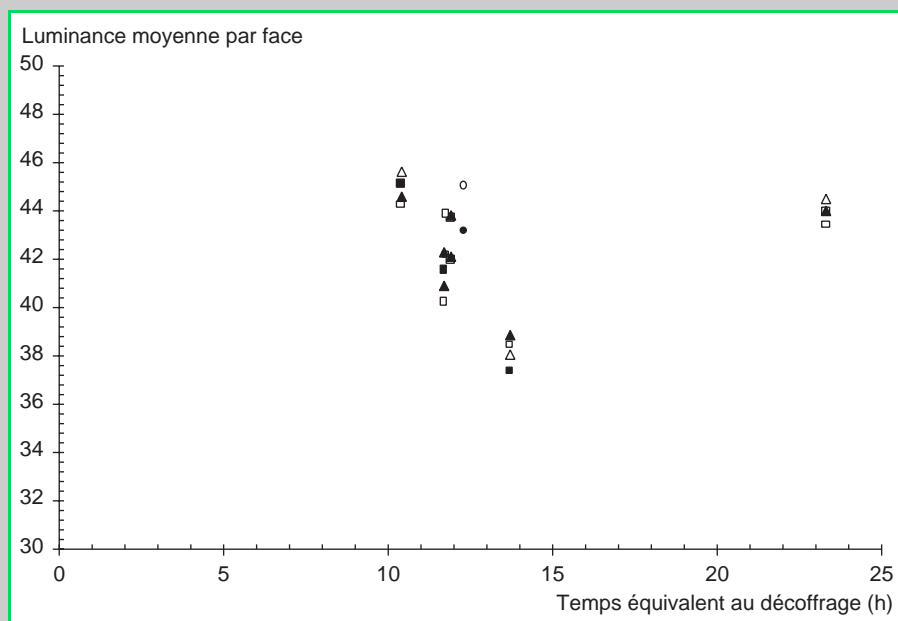


Fig. 4 - Suite

relevées correspondent aux niveaux 3 et 4 de l'échelle de gris du fascicule de documentation P 18-503 (cf. tableau III), et couvrent quasiment toute cette étendue.

Un seul élément a été coulé dans un moule calorifugé. On voit, d'après les valeurs du tableau II, que l'effet de cette isolation thermique est sensible sur la cinétique d'hydratation : pour une durée de coffrage réelle de 9,11 heures, l'âge équivalent au décoffrage est de 12,3 heures au milieu de la face, alors qu'avec un moule non isolé il faut maintenir le coffrage pendant plus de 10,4 heures (et moins de 11,3) pour atteindre une maturité identique. Ce corps d'épreuve ne se situe pas exactement au même niveau que ceux qui ont été coulés dans des moules non isolés (fig. 5). Par rapport à ces derniers, la luminance est plus élevée (béton plus clair).





*Fig. 5 - Influence de la maturité au décoffrage sur la luminance des parements. Le temps équivalent indiqué est la valeur prise au milieu de la face. La valeur de luminance (Y) représentée est la moyenne des 18 valeurs mesurées par face (un symbole par face). Carrés (□, ■) : mesures deux semaines après décoffrage ; triangles (Δ, ▲) : mesures cinq semaines après décoffrage. Cercles (●, ○) : corps d'épreuve coulé dans un moule calorifugé, mesures 20 jours après décoffrage.*

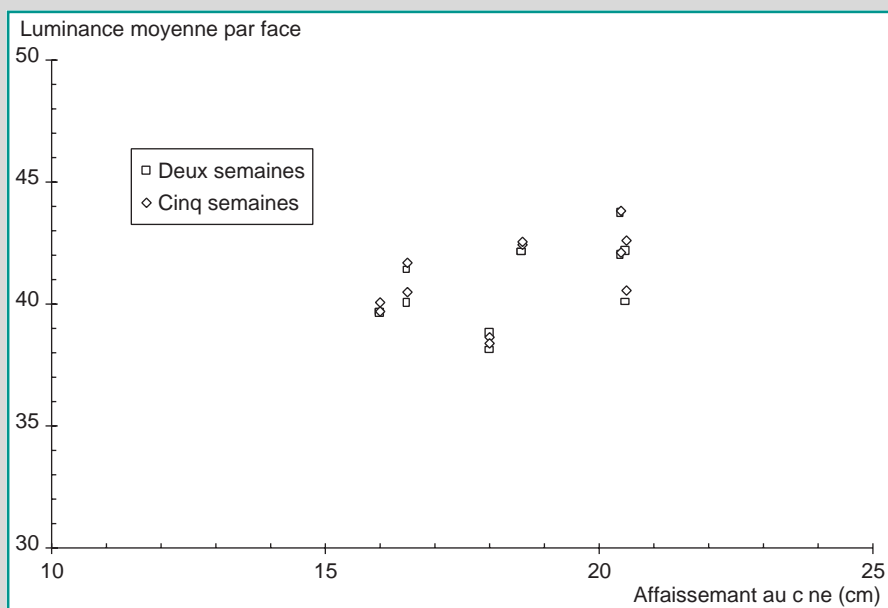
Les résultats de la figure 5 mettent en évidence que la répartition des échéances de décoffrage n'est pas optimale vis-à-vis du problème étudié : l'évolution entre 14 et 23 heures de temps équivalent au décoffrage est difficile à estimer en raison de l'absence de points de mesure dans cette période. À partir des mesures effectuées, on peut observer que la teinte du parement tend à être d'autant plus sombre que la durée de coffrage est élevée pour des faibles durées de coffrage. Elle semble passer par un minimum de luminance (parement le plus sombre), puis augmenter pour des valeurs plus élevées. En raison de la mauvaise répartition des échéances de décoffrage déjà évoquée, ce dernier point reste à préciser.

On peut noter qu'à une exception près, tous les corps d'épreuve ont été décoffrés avant que la température maximale soit atteinte. La figure 4 présente les températures enregistrées dans l'élément ayant eu le temps de coffrage le plus élevé (n° 10, durée réelle de 15 heures environ). On constate que la température atteint à peine son maximum, que ce soit à cœur ou sur la face. Pour tous les autres essais, le décoffrage a eu lieu dans la phase d'augmentation rapide de la température. Aucun corps d'épreuve n'a été décoffré dans la période de diminution de la température, ou à très longue échéance, lorsque l'évolution de température est très lente. L'effet du décoffrage sur l'évolution de la température dans le béton est très net. Dans la mesure où nous n'avons pas de mécanisme pour expliquer précisément l'influence de la maturité au décoffrage sur la teinte des parements, on ne peut pas exclure qu'un décoffrage plus tardif, pendant la période où la température diminue dans le corps d'épreuve, conduise à une évolution différente de la luminance en fonction de la maturité au décoffrage.

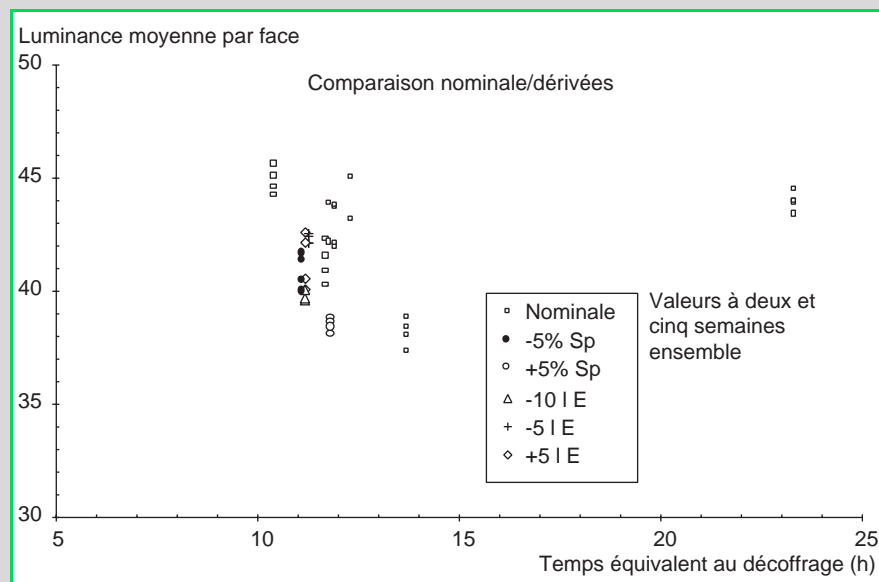
### **Influence de l'ouvrabilité du béton sur la luminance**

Les cinq formules dérivées retenues ont été décoffrées à des échéances aussi proches que possible, pour essayer de déterminer l'influence de l'ouvrabilité du béton sur la qualité des parements. Les résultats sont présentés sur la figure 6. Aucune tendance nette n'apparaît.

Le temps équivalent au décoffrage a légèrement varié d'un corps d'épreuve à l'autre. Il semble que cette variation de la maturité soit prépondérante par rapport à un éventuel effet de l'ouvrabilité du béton (fig. 7) tant que cette dernière évolue dans des limites acceptables sur chantier, comme ici où les formules testées correspondent à des formules dérivées hautes et basses.



*Fig. 6 - Évolution de la luminance moyenne par face en fonction de l'affaissement au cône pour les formules dérivées (eau ou superplastifiant).*



*Fig. 7 - Luminance moyenne par face en fonction de l'âge équivalent au décoffrage, pour l'ensemble des corps d'épreuve réalisés. Les carrés représentent les résultats des formules nominales, déjà présentés sur la figure 5. Pour ces éléments on a cherché à faire varier l'âge équivalent au décoffrage. Les autres symboles représentent les résultats obtenus avec les formules dérivées (pas de distinction entre les deux faces et les deux échéances de mesure). Pour ces corps d'épreuve, on a cherché à décoffrer toujours au même âge équivalent.*

## Homogénéité de teinte

Nous avons essayé de caractériser l'homogénéité de la teinte sur chaque parement, soit à partir des valeurs de luminance mesurées au colorimètre, soit à partir d'une observation visuelle directe et de photographies.

Un essai de caractérisation de l'homogénéité de la teinte à partir de photos traitées par un logiciel de traitement d'image (fig. 8) n'a pas été concluant. En effet, si ce logiciel permet de calculer une teinte moyenne sur une image en noir et blanc, ainsi que l'écart-type de la teinte sur une zone sélectionnée, les valeurs de la moyenne et de l'écart-type dépendent des traitements numériques subis par l'image (éclaircissement, etc.). Les références de teintes que nous avons placées à côté du corps



*Fig. 8 - Photos de deux des corps d'épreuve coulés avec la formule de référence. Il s'agit à chaque fois d'un tirage papier en couleur, numérisé, puis converti en noir et blanc.*

d'épreuve (nuancier de la norme P 18-503 et nuancier photo Kodak) n'ont pas permis de retrouver une valeur de référence avec les conditions de prise de vue utilisées.

Les résultats des mesures de luminance à deux semaines sont représentés sur les figures 9 et 10 pour chaque corps d'épreuve. Pour un même corps d'épreuve, la variation maximale de luminance mesurée est de l'ordre de dix points. Ramenée aux valeurs de l'échelle de gris du fascicule P 18-503, elle correspond à l'écart entre les niveaux 3 et 4 (cf. tableau IV).

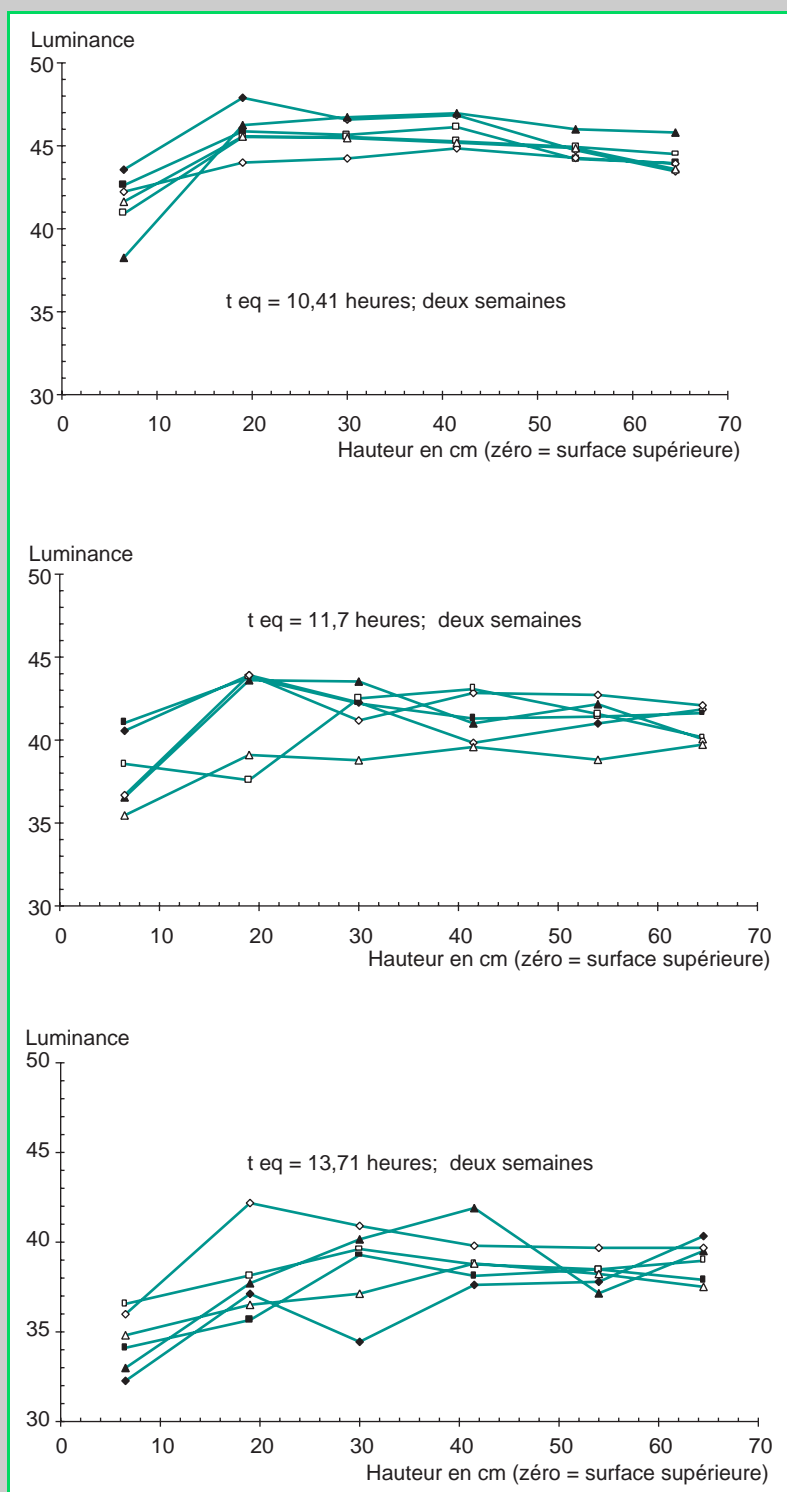
Sur l'ensemble de ces résultats, aucune tendance claire n'apparaît. Sur certains graphiques (fig. 9, courbe du haut, fig. 10, courbe du bas), on observe une courbe passant par un maximum ; la luminance est plus faible aux extrémités (en haut et en bas) du corps d'épreuve. La symétrie observée semble indiquer qu'il ne s'agit pas là d'un effet de ségrégation dans le coffrage, car on observerait alors une évolution monotone de haut en bas. Cette évolution de la teinte en fonction de la position sur la face n'est pas visible sur certains autres corps d'épreuve. On observe aussi ces deux types de comportement pour les formules dérivées.

Il est évident que l'évolution de l'hydratation ne se fait pas à la même vitesse en tout point du corps d'épreuve. Cela est visible sur la figure 4. Pour un même élément, la maturité au décoffrage est plus faible près des extrémités qu'au centre de la face.

Les simulations effectuées montrent bien qu'au moment du décoffrage, l'avancement de l'hydratation n'est pas homogène sur la surface (fig. 11). Les différences observées ne sont pas négligeables (cf. tableau V).

Si l'évolution observée sur une face (courbe passant par un maximum) était due à l'influence de la maturité au décoffrage, ces observations indiqueraient que la luminance est d'autant plus faible (béton plus sombre) que l'âge équivalent au décoffrage est faible.

Cette évolution est en contradiction avec les résultats obtenus sur les valeurs moyennes par face (fig. 5). Pour les valeurs d'âge équivalent considérées (inférieures à 15 heures), ces résultats montrent une diminution de la luminance (béton plus sombre) quand la maturité au décoffrage aug-



**TABLEAU V**

Âge équivalent et résistance après 15 heures de coffrage pour le corps d'épreuve présenté sur la figure 2. Les simulations correspondantes sont présentées sur la figure 11

	Âge équivalent (h)	Résistance (MPa)
Milieu de la face (point a)	23,13	29,2
Angle (point c)	19,99	24,4

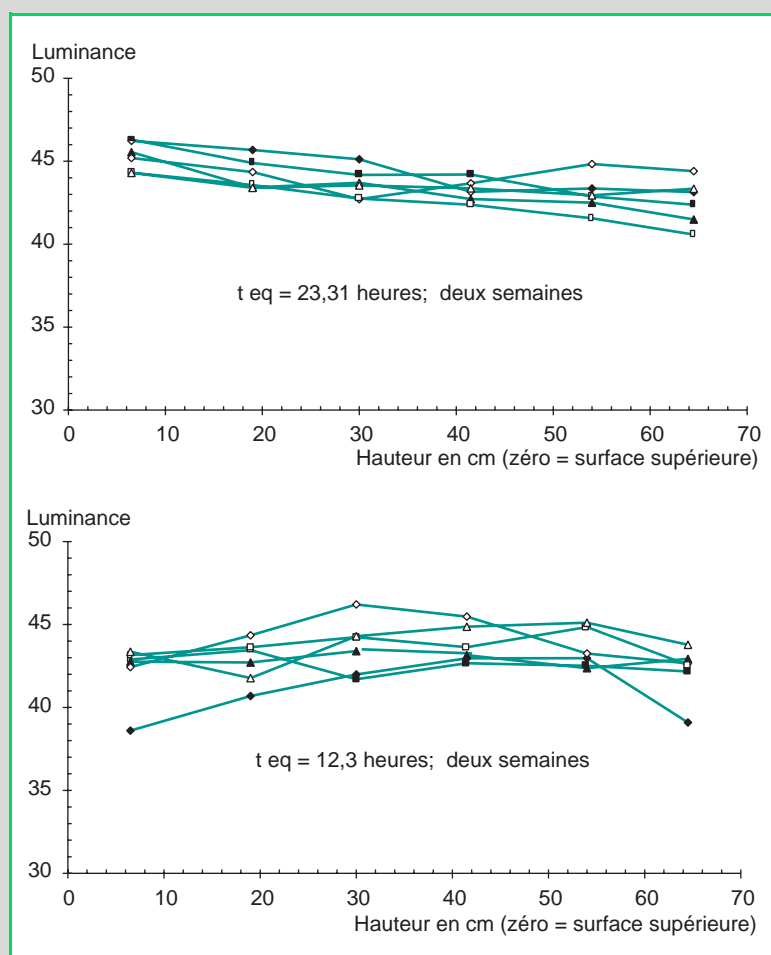
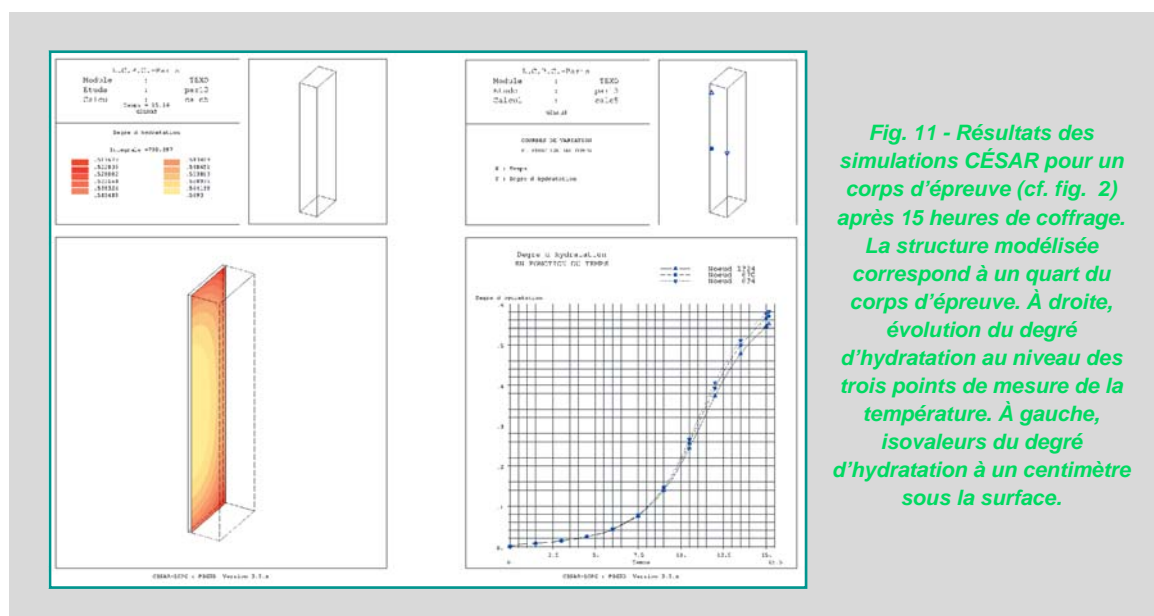


Fig. 10 - Valeurs de luminance mesurées sur les parements, formule nominale. Les échéances de décoffrage (en temps équivalent) sont indiquées sur les graphiques. Les symboles pleins correspondent à une face, les symboles creux à l'autre. Les carrés correspondent à la ligne centrale (cf. fig. 2).



mente. Il faut noter que, pour le moment, la maturité (ou le degré d'hydratation) prise en compte dans l'interprétation des données et dans les simulations est la valeur au moment du décoffrage. S'il est raisonnable de supposer qu'à partir de quelques heures au-delà du décoffrage, l'évolution de l'hydratation en peau est négligeable, il est en revanche plus difficile d'être affirmatif en ce qui concerne les premières heures suivant le décoffrage. L'étude de l'évolution de la maturité du béton de peau dans cette période, en particulier par simulation, est en cours.

Une autre hypothèse pour rendre compte de l'évolution de la teinte en fonction de la position des points de mesure sur la surface est celle de l'influence de l'effet de paroi. En effet, sur les angles du moule, le béton est soumis à un effet de paroi plus important qu'au milieu de la face, puisqu'il est alors au voisinage de deux parois. On s'attend à ce que le béton présent près des angles soit plus riche en pâte que celui présent à cœur. Cela pourrait conduire à une microstructure différente et, donc, à une teinte différente.

Il faut noter que les corps d'épreuve réalisés lors de cette étude étaient de forme simple (parallélépipèdes) et que la maturité sur une même face, bien qu'inhomogène, variait relativement peu d'un point à un autre de la surface. Pour des éléments de géométrie plus complexe, l'écart d'avancement entre les différentes parties d'un même élément peut être nettement plus important si celui-ci comporte des parties minces et des parties épaisses. En revanche, au niveau de la surface, ces différences seront nettement moins marquées. Dans cette zone, les échanges thermiques avec l'extérieur sont en effet prépondérants, et masquent partiellement les éventuelles hétérogénéités dues à la forme de l'élément. Cet effet sur un corps d'épreuve en T (fig. 12) est illustré sur les figures 13 et 14. L'évolution de l'avancement dans un angle est la même pour les deux géométries ; en revanche, on observe une différence pour les points situés au centre de la section (cf. tableaux V et VI). On constate que l'écart en degré d'avancement est plus important à cœur que près de la surface. Cela est vrai en valeur absolue (représenté sur la figure) et également en valeur relative.

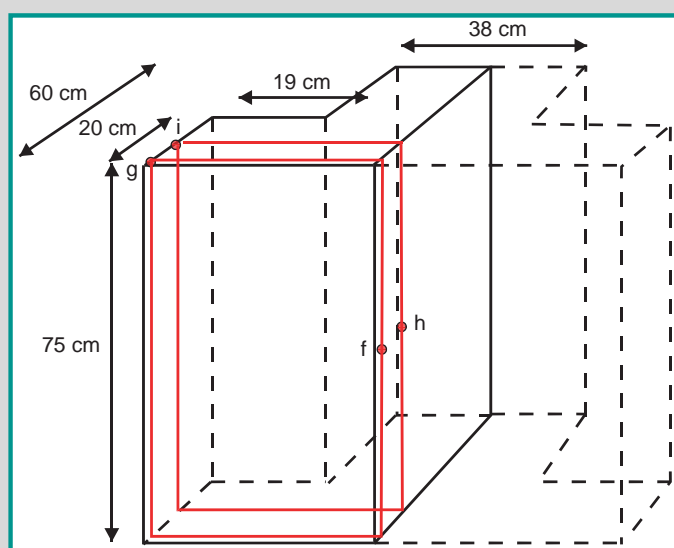
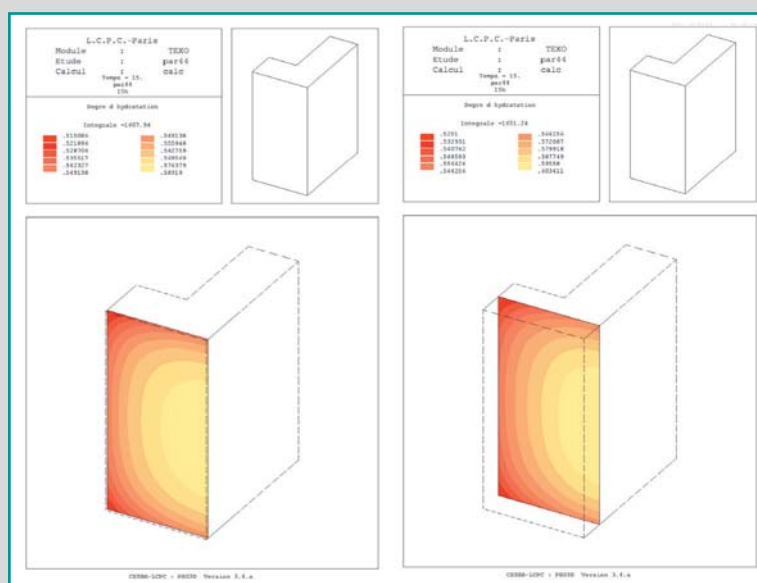
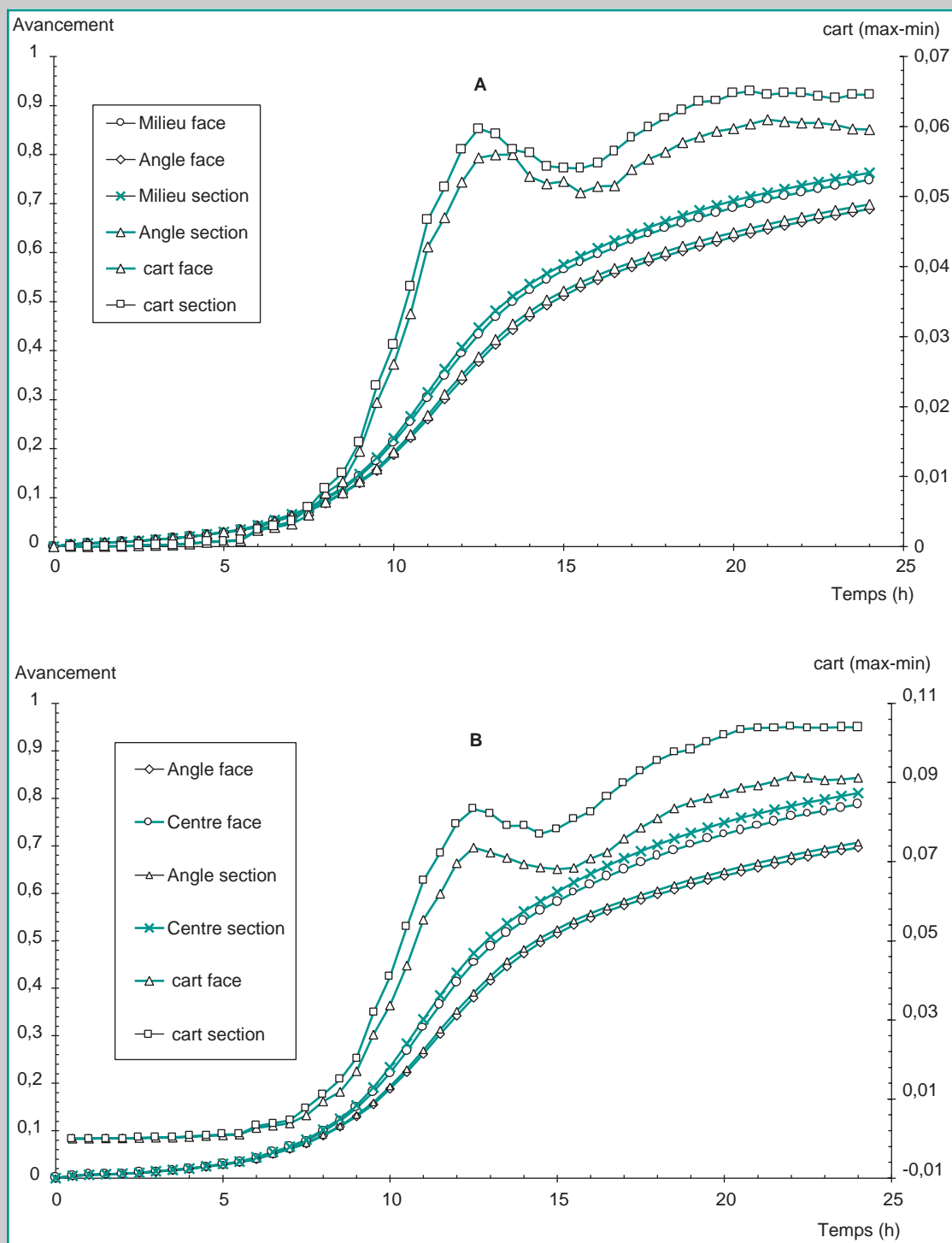


Fig. 12 - Corps d'épreuve en T utilisé pour les simulations.

Fig. 13 - Isovaleurs du degré d'hydratation après quinze heures pour un corps d'épreuve en forme de T, à un centimètre de la surface (à gauche) et dans une section intérieure (à droite). Les calculs ont été effectués avec les caractéristiques thermiques mesurées pour la formule de référence du béton de cette étude.



Quel que soit le sens de variation de la luminance en fonction de l'avancement (on rappelle que, d'après la figure 5, cette évolution n'est pas monotone), on aura donc des différences vraisemblablement peu marquées à la surface d'un élément donné, même si les différences de degré d'avancement à un moment donné sont importantes dans le volume. Ces différences pourraient devenir significatives dans le cas de géométries très complexes, ou de coffrages dont les propriétés thermiques changent d'un point de la surface à l'autre. On peut, en revanche, s'attendre à ce que des éléments décoffrés à des degrés d'avancement très différents présentent des différences de teinte.



**Fig. 14 - Évolution de l'avancement en différents points du corps d'épreuve utilisé en pratique et du bloc en T.**  
**A :** pour le corps d'épreuve utilisé dans cette étude. **B :** pour un corps d'épreuve en T (cf. fig. 2 et 12). Les degrés d'avancement sont ceux calculés dans l'angle supérieur droit et au milieu de l'arête verticale droite, en parement (points c et a, et points g et f) et dans la section interne (points e et d, et points i et h). L'écart (axe de droite) est la différence entre les degrés d'avancement en ces deux points.



**TABLEAU VI**  
**Âge équivalent et résistance au moment du décoffrage pour le corps d'épreuve en T présenté sur la figure 12. Les simulations sont présentées sur la figure 13**

	Âge équivalent (h)	Résistance (MPa)
Milieu de la face (point f)	24,64	31,3
Angle (point g)	20,15	24,7

## Conclusions et perspectives

Cette étude a permis de mettre en évidence que la maturité au décoffrage a une influence sur la teinte des parements. Cette influence est supérieure à celle de variation de l'ouvrabilité du béton qui n'a pas d'influence dans les limites explorées lors de cette étude, représentatives des variations admissibles sur chantier. Pour des âges équivalents au décoffrage inférieurs à 15 heures, le parement est d'autant plus foncé que le coffrage est maintenu longtemps. Pour une valeur nettement plus élevée de l'âge équivalent au décoffrage, la tendance de l'évolution s'inverse et le parement est plus clair. Cependant, la répartition des points expérimentaux en terme de durée de coffrage, lors de cette étude, n'a pas été optimale au vu de l'analyse finale des résultats et cette tendance à une évolution passant par un minimum de luminance demande à être confirmée. De plus, l'évolution de la teinte suivant la position des points de mesure sur une même face d'un corps d'épreuve montre, sur certains éléments, une évolution qui irait en sens contraire de celle que nous venons de présenter, mais qui pourrait s'expliquer par un effet de paroi.

Globalement, on n'observe pas de variation dans l'homogénéité de la teinte des parements sur des corps d'épreuve de forme simple en fonction des paramètres de cette étude. La maturité au décoffrage a une influence sur la teinte, mais des essais complémentaires semblent nécessaires pour préciser les limites dans lesquelles cet effet est sensible.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] *Parements en béton*, Fascicule de documentation, Projet National CALIBÉ. Opération du plan Génie Civil, La collection de l'IREX, Bétons, janvier **2001**.
- [2] *Défauts d'aspect des parements en béton*, Techniques et méthodes des LPC, **1991**.
- [3] Fascicule de documentation P 18-503, *Surfaces et parements de béton. Éléments d'identification*, publié par l'Afnor en novembre **1989**.
- [4] *Résistance du béton dans l'ouvrage : La maturométrie*, Guide et recommandations, Projet National CALIBÉ, Opération du plan Génie Civil, La collection de l'IREX, Bétons, janvier **2001**.
- [5] HUMBERT P., CÉSAR-LCPC, Un code général de calcul par éléments finis, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **160**, **1989**, pp. 112-115.
- [6] Notice d'utilisation du Chromamètre CR 231, Minolta.