

BétonlabPro 3
Leçon N°9
Le cahier des charges

François de Larrard
Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
Centre de Nantes

Plan de la leçon

- Définition - Généralités
- Cahier des charges vs. BétonlabPro
- Spécification des principales propriétés
- Principes à observer, pièges à éviter
- Conclusion



Définition - Généralités

- Cahier des charges = ensemble des conditions que le béton doit satisfaire pour un usage opérationnel donné
- Cahier des charges = définition du problème à résoudre par le formulateur
- Etape critique du processus de formulation
- Conditionné par la destination du béton et l'ensemble des acteurs/phases d'utilisation



Définition - Généralités

- Contient des obligations de résultats (performances)
- Contient des obligations de moyens (prescriptions)
- Un critère à optimiser (en général, le coût, mais pas toujours)



Cahier des charges vs. BétonlabPro

- Nécessité de traduire le cahier des charges dans le cadre de BétonlabPro
 - certaines propriétés ne sont pas gérées par le logiciel
 - certains paramètres du logiciel (ex: indice de serrage) ne correspondent pas à des propriétés mesurables
- Ensuite, possibilité de formuler par simulations successives (cf. leçon N°10) ou par optimisation automatique (N°11)



Spécification des principales propriétés



Spécification des principales propriétés: l'affaissement (ou slump)

| Application | Affaissement désiré (mm) |
|--|---------------------------------|
| Préfabrication industrielle – Bétons secs pour démoulage immédiat | 0 |
| Béton pour chaussées mis en place à la machine à coffrage glissant | 20/50 |
| Béton de résistance normale pour structures armées ou précontraintes | 80/150 |
| Béton à Haute Performance coulé sur chantier | 180/250 |
| Béton autoplaçant | > 250 (étalement > 600mm) |



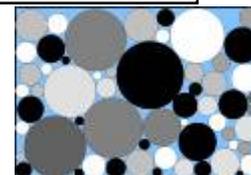
Spécification des principales propriétés: l'affaissement (suite)

- Très important (bien que non prise en compte dans BétonlabPro): la durée pratique d'utilisation. Dépend:
 - de la durée de fabrication (ex.: un camion de BHP = 30 minutes)
 - de la durée de transport
 - de la durée de mise en œuvre
- Valeurs typiques:
 - sur chantier: 1 à 2 heures
 - en préfabrication: 20' à 1 heure
- Effet de la température



Spécification des principales propriétés: l'indice de serrage

| Procédé de coulage et type de béton | $K \leq$ |
|---|----------|
| Vibration, sans superplastifiant | 6 |
| Vibration, avec superplastifiant BHP | 7,5 8 |
| Béton compacté au rouleau | 14 |
| Béton projeté (procédé humide), sans superplastifiant | 5,5 |
| Béton projeté (procédé humide), avec superplastifiant | 7,5 |
| Béton autoplaçant | 7 |

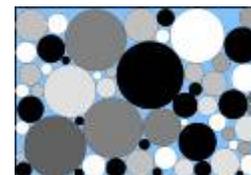


Spécification des principales propriétés: teneur en air

| | | | |
|---|----------|-----------|-----------|
| Taille maximale des granulats (mm) | 8 | 16 | 32 |
| Minimum d'air contenu (%) | 6 | 5 | 4 |

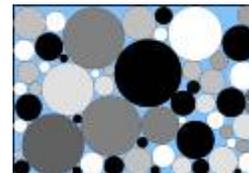
(pour les bétons devant résister au gel, selon l'EN 206)

Attention: le volume d'air ne garantit pas toujours la résistance au gel, conditionnée par la distance moyenne entre bulles (\bar{L})



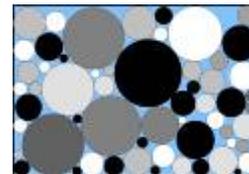
Spécification des principales propriétés: résistance au jeune âge

| Type d'utilisation | Objet | Age du béton | Résistance à la compression |
|---|-------------------------------------|--------------|-----------------------------|
| Béton de structure pour le bâtiment | Décoffrage | 14/16 h | 5 MPa |
| | Retrait des étais | 20/36 h | 10 MPa |
| Béton précontraint pour pont construit par encorbellement | Décoffrage | 14/16 h | 10 MPa |
| | Mise en tension des premiers câbles | 10/36 h | 15/20 MPa |



Spécification des principales propriétés: élévation de température

- BétonlabPro calcule $\Delta\theta$ en conditions « adiabatiques »
- En général, la température monte moins (perte thermique par conduction)
- Pour une pièce donnée, l'écart entre conditions adiabatiques et conditions réelles est d'autant plus fort que le béton est riche en additions



Spécification des principales propriétés: retrait endogène

- Retrait s'effectuant pendant la prise et le durcissement
- Surtout pour les BHP (bétons à hautes performances)
- Gênant si une pièce est empêchée dans ses déformations
- Il peut être prudent de le limiter à $200 \cdot 10^{-6}$ suivant les cas



Spécification des principales propriétés: $R_{C_{28}}$

- BétonlabPro prédit une résistance *moyenne* de laboratoire, sur cylindre
- Résistance sur cylindre $\approx 80\%$ de la résistance sur cube (le rapport peut varier en fonction notamment des granulats)
- Pour une valeur de $f_{c_{28}}$ donnée (résistance caractéristique), il faut prendre une marge de sécurité de 10 à 20 %



Spécification des principales propriétés: $R_{c_{28}}$ (suite)

- Résistances caractéristiques sur cylindre recherchées (valeurs typiques)
 - bâtiment: 20 à 30 MPa;
 - ouvrages d'art: 30 à 80 MPa
- Exemple: B 35/C45 pour ouvrage d'art
 - dans BétonlabPro, $R_{c_{28}} \geq 1,2 \times 35 = 42$ MPa
 - si essais sur cubes, on cherchera à *mesurer* des valeurs $\geq 1,2 \times 45 = 54$ MPa



Spécification des principales propriétés: Rt_{28}

- Pour certaines applications (ex: chaussées), résistance en traction requise
- Résistance par fendage, sur cylindre, en général retenue
- Valeurs typiques:
 - béton de chaussée (couche supérieure): $ft_{28} = 3,3$ MPa (valeur caractéristique)
 - béton maigre (fondation): $ft_{28} = 2,2$ MPa



Spécification des principales propriétés: module élastique

- BétonlabPro calcule le module élastique à 28 jours
- Pour un jeu de matériaux donné, dépend surtout de Rc_{28}
- Pour les cas où l'on cherche un module particulièrement élevé, choisir un granulat à fort module



Spécification des principales propriétés: retrait total

- BétonlabPro calcule une estimation du retrait total depuis la prise jusqu'au long terme, à 50 % d'humidité moyenne
- Exemple: si un béton présente un retrait de $500 \cdot 10^{-6}$ à 50 % d'humidité, la valeur à 70 % d'humidité sera

$$\frac{(100 - 70)}{(100 - 50)} \times 500 = 300 \cdot 10^{-6}$$



Spécification des principales propriétés: retrait total (suite)

- Il est rare de spécifier une valeur de retrait
 - Evaluation du retrait = garde-fou pour éviter
 - surdosages en liants
 - surdosages en eau
 - squelettes mal proportionnés
 - excès de fines
- générateurs de risques de fissuration



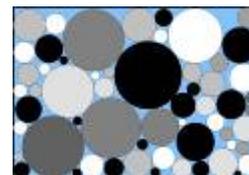
Spécification des principales propriétés: fluage

- BétonlabPro calcule le fluage propre (sans séchage) et le fluage total (à 50 % d'humidité)
- Rarement considéré sauf en béton précontraint et/ou en cas de structures très souples
- Pour le réduire:
 - augmenter $R_{c_{28}}$
 - utiliser des fumées de silice



Spécification des principales propriétés: durabilité

- Béton durable si compatible avec une durée de vie minimale de la structure dans un environnement donné
- Il faut limiter la vitesse de dégradation:
 - corrosion des armatures (la plus fréquente)
 - gel-dégel (dans la masse et/ou écaillage superficiel)
 - réactions de gonflement: alcali-réaction, formation d'ettringite différée)
 - attaques acides etc.



Spécification des principales propriétés: durabilité (suite)

- Nombreuses propriétés physico-chimiques du béton en jeu
- Difficulté de les mesurer, peu de normes d'essai
- Pas de modèles les reliant à la formulation
- On privilégie une approche prescriptive (obligation de *moyens*)
- Cas d'ouvrages exceptionnels: on vérifie expérimentalement l'atteinte de seuils sur la formule à valider



Spécification des principales propriétés: durabilité (suite)

- La plupart des cahiers des charges spécifient la durabilité
 - en définissant un environnement
 - en interdisant certains constituants pour cet environnement
 - en définissant un liant équivalent (cf. leçon N°8)
 - en fixant une valeur mini de $l_{\text{éq}}$ et maxi de $e/l_{\text{éq}}$ (e = eau efficace)
 - parfois, clause de $f_{c,28}$ minimal et % d'air entraîné minimal (gel/dégel)



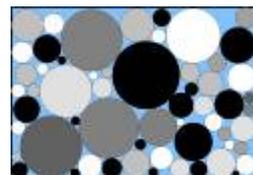
Spécification des principales propriétés: durabilité (suite)

- Exemple selon l'EN 206:
 - environnement XC1
 - $l_{\text{éq}} \geq 260 \text{ kg/m}^3$
 - $e/l_{\text{éq}} \leq 0,65$
 - $f_c \geq 20 \text{ MPa}$ (sur cylindre)
- BétonlabPro, connaissant la classe d'environ^t
 - calcule $l_{\text{éq}}$ et $e/l_{\text{éq}}$ selon l'EN 206 pour toute formule simulée
 - demande qu'on lui fixe le % d'air, et non d'adjuvant entraîneur d'air (cf. Leçon N°11)



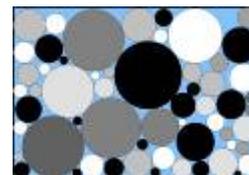
Spécification des principales propriétés: durabilité (suite)

- Cas de l'alcali-réaction
 - cf. recommandations LCPC
 - si granulats non réactifs, pas de pb
 - si granulats PR ou PRP, possibilité d'accepter une formule en effectuant le bilan des alcalins
 - seuils à observer sur la valeur moyenne et la valeur maximale d'alcalins totaux
 - BétonlabPro calcule les deux taux d'alcalins pour toute formule simulée



Spécification des principales propriétés: durabilité (suite)

- Cas de la formation d'ettringite différée
 - cf. guide technique LCPC
<http://www.lcpc.fr/fr/sources/airs3/notice.php?idairs=ER000002026>
 - si pièce massive + présence d'eau, risque à considérer
 - détermination du niveau de prévention
 - choix d'un cas en considérant la nature du ciment et des autres liants, le bilan des alcalins et la température maximale atteinte en cours de prise dans l'ouvrage
 - BétonlabPro peut constituer une aide, mais d'autres approches (calculs, essais) sont nécessaires



Principes à observer, pièges à éviter

- **Se référer aux règlements et aux normes pertinentes**
- **Consulter chaque partenaire impliqué dans l'acte de construire**
- **Vérifier attentivement chaque étape de l'utilisation du béton ou de la structure, à la lumière des expériences passées**



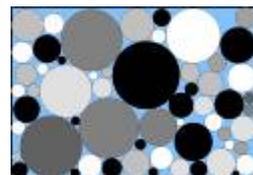
Principes à observer, pièges à éviter (suite)

- **Ne pas établir des spécifications non réalistes**
- **Eviter les conflits de spécifications**
- **Ne pas changer les spécifications durant l'étude de formulation**
- **Commencer suffisamment tôt l'étude de la formulation**



Conclusion

- BétonlabPro prévoit jusqu'à 30 caractéristiques différentes pour chaque formule simulée
- Possibilité d'une grande variété de cahiers des charges multi-critères
- Possibilité de dépasser les règlements de calcul qui ramènent de nombreuses propriétés à la seule valeur de $f_{c_{28}}$



Conclusion (suite)

- Possibilité pour un béton
 - d'être mieux adapté à son usage
 - d'optimiser l'utilisation de la ressource en matériaux disponibles
- Mais l'établissement du cahier des charges devient plus complexe
- Le cahier des charges doit donc être mûrement réfléchi !

