

Technologie du béton – GCI 340

Ammar Yahia, ing., Ph.D.
Génie civil

Automne 2011

CHAPITRE 6 : Propriétés mécaniques du béton

Plan:

- Source de résistance
- Source de faiblesse
- Facteurs affectant la résistance du béton
 - Caractéristiques du béton
 - Effet de la compacité
 - Degré d'hydratation et mûrissement
 - Paramètres d'essais
- Résistances mécaniques (f'_c , f_t , flex, triaxial)

Résistance mécanique du béton:

- La résistance mécanique du béton est évolutive -- elle augmente beaucoup au cours du premier mois après coulage.
- On considère que cette valeur est stable et quasi-maximale à 28 jours.
- La résistance des bétons dépend en grande partie du type de sollicitation auxquels ils sont soumis.

Exemples:

- Une résistance à la compression – 20 à 40 MPa (peut être multiplié par dix pour certain type de béton à usage bien spécialisé)

Exemple (suite):

- Une faible résistance en traction -- 10% à 15% de la résistance en compression.
- La résistance en flexion est usuellement définie par une valeur légèrement inférieure à la racine carrée de la résistance en compression.
- La résistance en cisaillement du béton est d'environ 5% de la résistance en compression.

1. SOURCE DE RÉSISTANCE

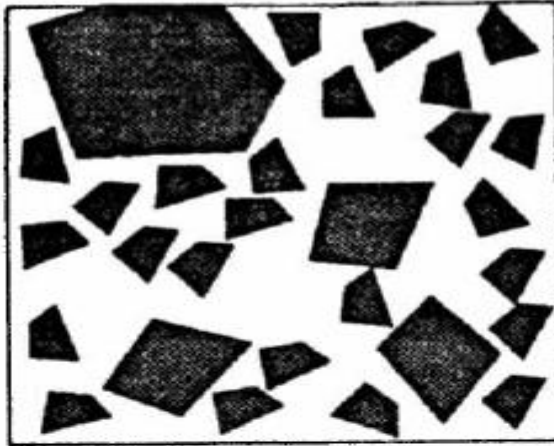
- Effet filler -- réduction des pores dans la matrice cimentaire. Dépend:
 - degré d'hydratation
 - formulation, réactivité,
 - méthode de cure
 - consolidation, etc.

1. SOURCE DE RÉSISTANCE

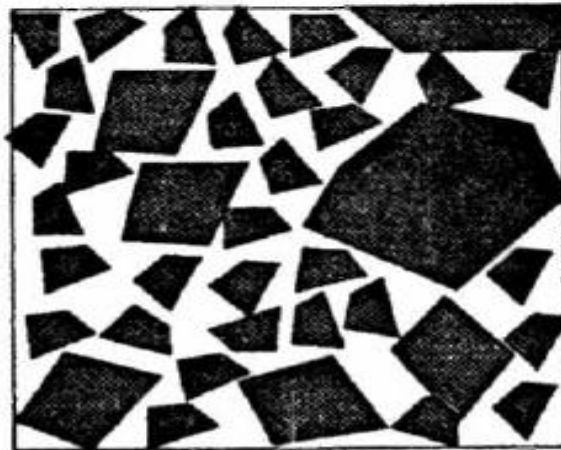
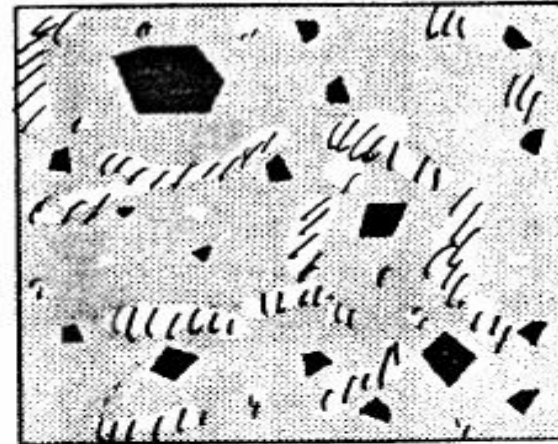
- L'adhérence entre les surfaces de solide à cause des forces physiques de surface d'attraction (Van der Waals). Ces forces dépendent:
 - de la nature et quantité des surfaces solides.
 - de la quantité des surfaces solides

A. Effet filler

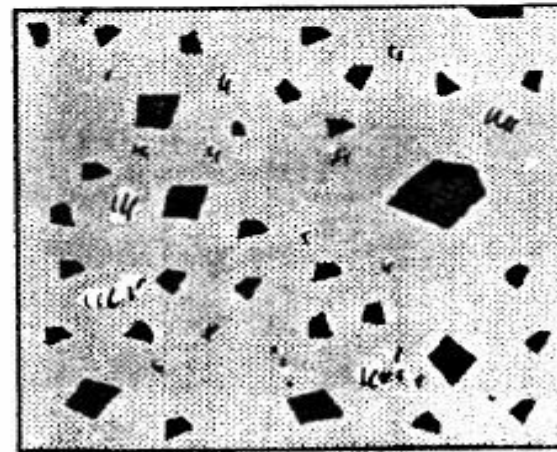
$\alpha = 0\%$



$\alpha = 80\%$



W/C
0.30



 Anhydrous cement

 Hydration products

 Pores

Adhérence dépend de la nature et quantité des surfaces solides

1. Dans une pâte complètement hydratée le volume de C-S-H $>$ CH (50-60% vs 20-25% du volume de solides).
2. Forces de surface de C-S-H $>$ CH (surface spécifique) -- hydratation de $\beta\text{C}_2\text{S}$ produit plus de C-S-H que celle de C_3S .
3. Cristaux de l'étringite et de la monosulfate ont des surfaces spécifiques élevées, mais volumes limités.

Adhérence dépend de la nature et quantité des surfaces solides

Les produits d'hydratation (C-S-H) développent leur adhérences:

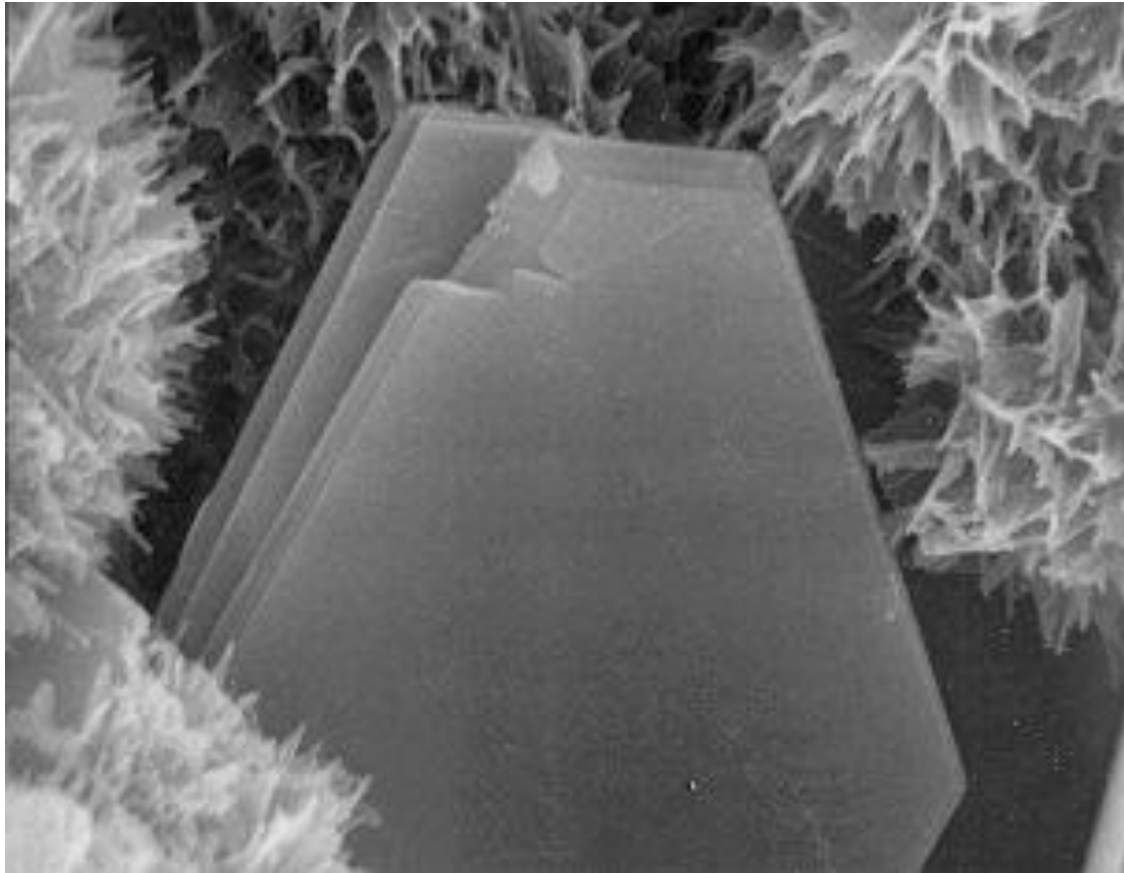
- entre eux
- avec des solides ayant de faible surfaces spécifiques – CH, grains de ciment non hydratés et granulats (Mehta 1986)

CSH:

- Un gel rigide – surface spécifique des particules colloïdales dans le C-S-H de l'ordre de 100 à 700 m²/g

Réactions:

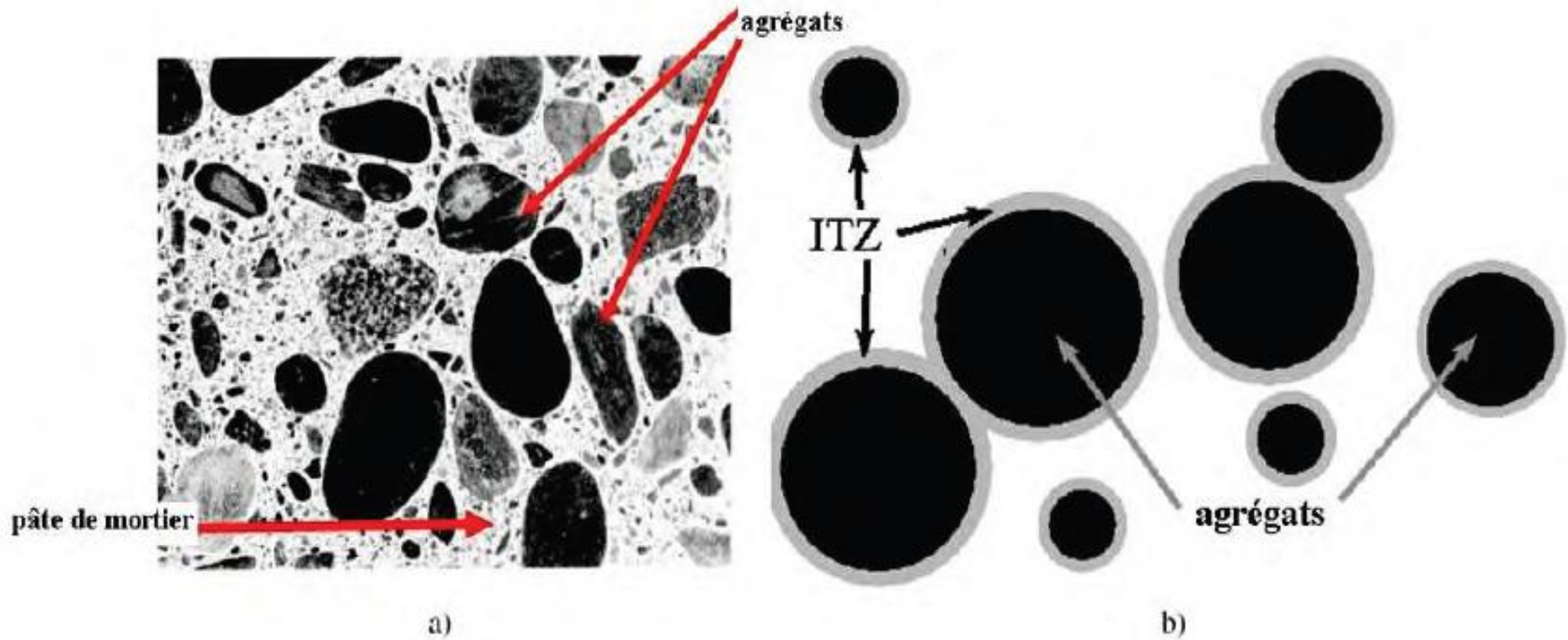




2. SOURCE DE FAIBLESSE

- Le béton est un matériau composite complexe -- granulats (sable, gravillons) agglomérés par un liant.
- Le béton à une échelle mésoscopique comporte trois phases principales: granulats, mortier et la zone interfaciale de transition (ITZ)

2. SOURCE DE FIABLESSE



Raphaëlle Narr, 2009

2. SOURCE DE FAIBLESSE

- La zone interfaciale de transition = représente la pâte de mortier localisée à la surface des gros agrégats (Farran, 1956)
- Cette zone a des propriétés mécaniques et de transferts très différents de celles de la pâte de mortier
- faible résistance et son épaisseur varie entre 20 et 50 μm . Dépends:
 - De la forme,
 - De la rugosité,

2. SOURCE DE FAIBLESSE

- la porosité des granulats,
- la teneur en granulats,
- type de ciment,
- E/C – qualité du mortier

2. SOURCE DE FAIBLESSE

- Vides (-) -- les bulles d'air, les microfissures et les grands pores capillaires ($> 50 \text{ nm}$).
- La porosité capillaire d'une pâte de ciment peut être nulle si le ciment s'hydrate complètement et le rapport $E/C < 0,3$

2. SOURCE DE FAIBLESSE

- Résistance vs la porosité des matériaux

homogènes : $S = S_0 e^{-kp}$

S = résistance à la compression,

S_0 = résistance à la compression

correspondant à une porosité nulle,

p = porosité

k = constante

3. FACTEURS AFFECTANTS LA RÉSISTANCE

A. CARACTÉRISTIQUES DU BÉTON

1. *Rapport E/C* -- Loi de Abram (1918)

$$f_c = k_1 \div (k_2)^{E/C}$$

k_1 et k_2 = constantes

- Tient compte seulement de la porosité de la pâte hydratée

3. FACTEURS AFFECTANTS LA RÉSISTANCE

A. CARACTÉRISTIQUES DU BÉTON

- Ok pour bétons des rapports E/C élevés (porosité de la pâte et Z.T. élevée).
- Rapports $E/C \leq 0,3$ la porosité capillaire dans la pâte diminue et la densité et les grandeurs des cristaux dans la Z.T. diminuent -----> peu de faiblesse -----> la résistance augmente **rapidement** avec la diminution du rapport E/C (relation non linéaire).

3. FACTEURS AFFECTANTS LA RÉSISTANCE

2. *VOLUME D'AIR*

L'air – porosité (++) et diminue la résistance.

$$f_c = k [1 \div (1 + V_e/V_c)]^2$$

k = constante;

V_c et V_e = volumes de ciment et d'eau

3. FACTEURS AFFECTANTS LA RÉSISTANCE

2. *VOLUME D'AIR*

Le teneur d'air piégé dans un béton dépend:

1. Du volume de pâte.

Moins grand est le ϕ_{\max} (surface spécifique élevée) plus de pâte est nécessaire pour maintenir une maniabilité désirée -----> plus d'air peut être piéger,

2. Qualité de la pâte -- E/C et fluidité

3. FACTEURS AFFECTANTS LA RÉSISTANCE

2. *VOLUME D'AIR*

- Le $f'c$ du béton diminue avec la teneur en air à raison de 5:1, surtout pour les bétons à faible E/C

- $f'c$ peut augmenter par la présence d'air pour les bétons ayant:

- * un E/C élevés – réduit le ressuage

- * Teneur faible en ciment (et peu maniable)
– améliorent la compacité

3. FACTEURS AFFECTANTS LA RÉSISTANCE

3. COMPOSITION ET FINESSE DU CIMENT

- Type de ciment
- dosage
- finesse

4. AJOUTS CIMENTAIRE

3. FACTEURS AFFECTANTS LA RÉSISTANCE

4. AJOUTS CIMENTAIRES

L'effet des ajouts sur la résistance de béton dépend:

- * du type et de la teneur,
- * du mode d'utilisation: remplacement ou addition,
- * du mode, de la durée et de la température du mûrissement,
- * de la formulation du mélange de béton ...

3. FACTEURS AFFECTANTS LA RÉSISTANCE

5. CARACTÉRISTIQUES DES GRANULATS

Plusieurs propriétés des granulats influencent:

- le rapport E/C nécessaire pour obtenir une maniabilité désirée
- l'adhérence avec la pâte (Z.T.).

5. CARACTÉRISTIQUES DES GRANULATS

1. Résistance des granulats

- la porosité de granulat
 - la présence des plans de clivages
- influencent résistance du granulat et celle du béton -- effet critique BHP!!
- Donc dépend de la qualité de la pâte = E/C

5. CARACTÉRISTIQUES DES GRANULATS

1. Résistance des granulats

- A. Effet **secondaire** -- quand rapport E/C est élevé car la résistance du granulat est plus élevée que celle de la pâte et de la Z.T.
- B. Effet **important** quand rapport E/C est faible car la résistance de la pâte et Z.T. augmentent

5. CARACTÉRISTIQUES DES GRANULATS

2. ϕ_{\max} des granulats

- grand ϕ_{\max} réduit la demande en eau nécessaire pour une certaine maniabilité → ++ améliore la résistance du béton.
- Par contre, la résistance de la Z.T. diminuent avec l'augmentation de ϕ_{\max} , surtout si le béton est fluide (ressuage) – plus critique avec ft!!

5. CARACTÉRISTIQUES DES GRANULATS

3. Granulométrie

- Pour un rapport E/C et ϕ_{\max} fixés, une variation de la granulométrie des granulats peut influencer:
 - la cohésion
 - la stabilité du béton

CE QUI INFLUENCE LA QUALITÉ DE Z.T

5. CARACTÉRISTIQUES DES GRANULATS

3. Nature de la surface

- **Surface rugueuse = une bonne adhérence physique (frottement) entre la pâte de ciment et les granulats (granulats concassés)**
 - **fc du béton > fc** d'un béton similaire qui contient des granulats ayant des surfaces lisses (E/C constant).

5. CARACTÉRISTIQUES DES GRANULATS

3. Nature de la surface

- Ce phénomène (adhérence physique) est important pour le développement de la résistance en traction au jeune âge**
- Il devient moins important pendant le mûrissement parce que l'adhérence chimique se développe entre les granulats et la pâte de ciment.**

5. CARACTÉRISTIQUES DES GRANULATS

3. Nature de la surface

Cependant!! Granulats concassés augmente la demande d'eau (E/C)!! Alors:

- Effet bénéfique (augmentation de l'adhérence physique au jeune âge) peut être annulée par la diminution de résistance à cause du dosage élevée en eau nécessaire pour obtenir une fluidité donnée

5. CARACTÉRISTIQUES DES GRANULATS

4. Composition minéralogique des granulats

- Influence l'adhérence **chimique** entre le granulat et la pâte hydratée

Exemple:

granulat **calcaire** donne une meilleur résistance qu'un granulat à base de grès [MEHTA (1986)].

6. EAU DE GÂCHAGE

Critère d'acceptation: si elle:

- * développe une $f'c \geq 90\%$ que celle du mortier fait avec l'eau témoin,
- * ne change pas considérablement le temps de prise :

$$(t_{\text{initiale}} - 60 \text{ min}) \leq t \leq (t_{\text{finale}} + 90 \text{ min})$$

L'eau de mer (35000 ppm de sels solubles) ne diminue pas la résistance du béton -- risques de prise rapide et de corrosion.

7. ADJUVANTS

- SP et RD – augmente la résistance
- En général, AEA diminue la résistance.
- Retardateurs et accélérateurs de prise -- influencent la résistance à jeune âge et peuvent changer un peu la résistance maximale du béton.
- Effet des ajouts cimentaires & **pouzzolane** – dépend du type, teneurs, mode d'utilisation, formulation du béton, de la maturité, etc.

3. FACTEURS AFFECTANTS LA RÉSISTANCE

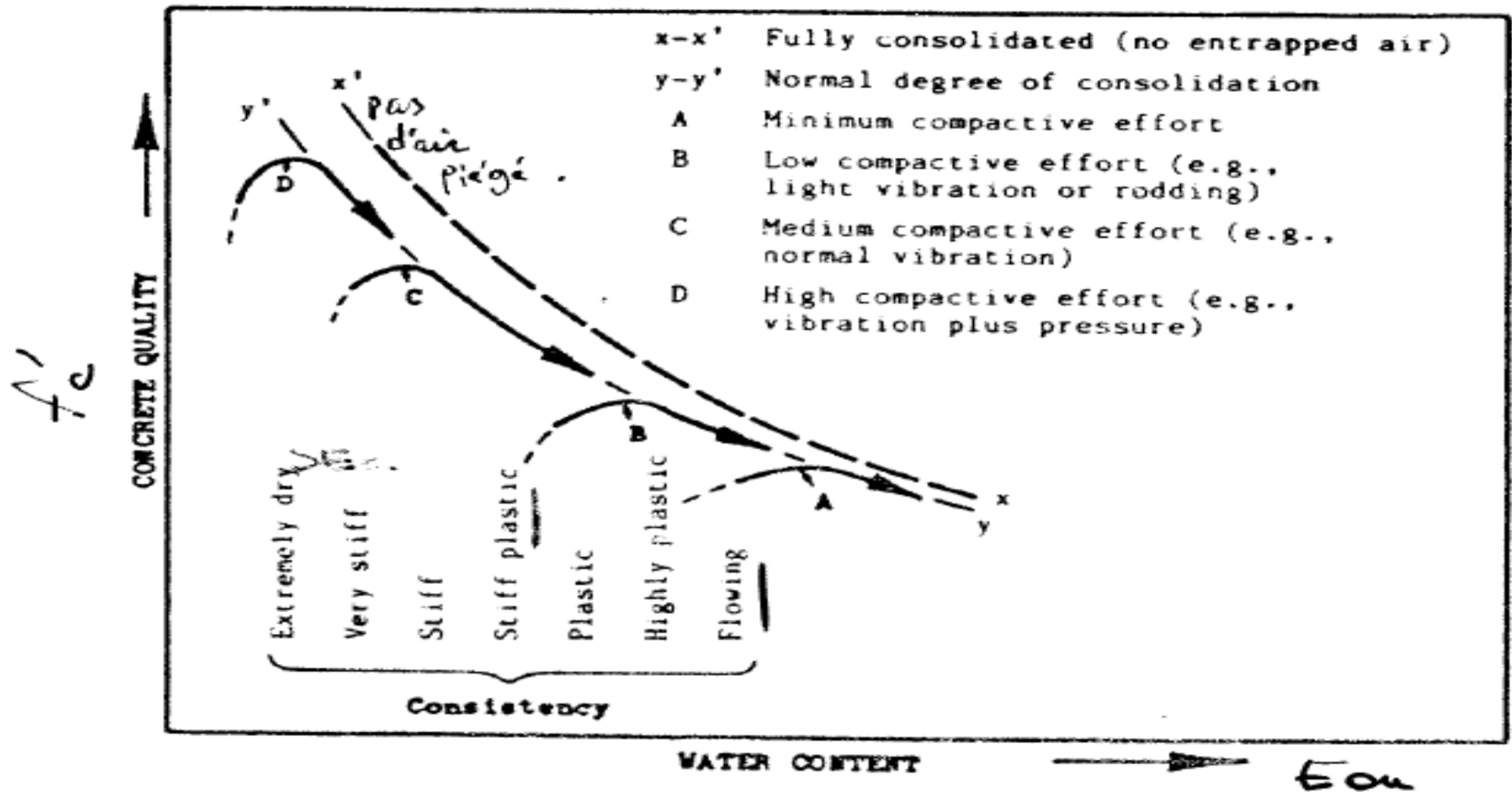
B. COMPACTITÉ

- La consolidation → augmente la résistance.
 - * libération des bulles d'air piégées
 - * Effet plus important quand la viscosité est faible
- Vibration, pilonnage à la main
- Quand la viscosité est élevé – vibration ou pilonnage?

la consolidation par vibration!!

3. FACTEURS AFFECTANTS LA RÉSISTANCE

B. COMPACTITÉ



Effet de consolidation sur la qualité du béton [ACI 309R (1987)]

3. FACTEURS AFFECTANTS LA RÉSISTANCE

C. DEGRÉE D'HYDRATATION ET MÛRISSEMENT

- La porosité capillaire influence la densité, la résistance, l'imperméabilité et la durabilité du béton.
- Pour que le béton atteigne les caractéristiques prévues il faut :

3. FACTEURS AFFECTANTS LA RÉSISTANCE

C. DEGRÉE D'HYDRATATION ET MÛRISSEMENT

- * empêcher la perte d'humidité et le séchage rapide
- * protéger suffisamment le béton pendant un temps défini contre le gel et les températures anormalement élevées

3. FACTEURS AFFECTANTS LA RÉSISTANCE

C. DEGRÉE D'HYDRATATION ET MÛRISSEMENT

1. Effet de la durée du mûrissement

- Avec un mûrissement adéquat par voie humide à une température favorable (15 à 20°C) -- la vitesse d'hydratation est rapide durant les premiers jours

3. FACTEURS AFFECTANTS LA RÉSISTANCE

C. DEGRÉE D'HYDRATATION ET MÛRISSEMENT

1. Effet de la durée du mûrissement

- La durée du mûrissement initiale nécessaire pour assurer la protection du béton contre les pertes d'humidité dépend :

- * du type de ciment et ajout minéral,
- * des proportions du mélange,
- * de la résistance requise,

3. FACTEURS AFFECTANTS LA RÉSISTANCE

C. DEGRÉE D'HYDRATATION ET MÛRISSEMENT

1. Effet de la durée du mûrissement

- La durée du mûrissement initiale nécessaire pour assurer la protection du béton contre les pertes d'humidité dépend :

- * de la température du béton,
- * des conditions atmosphériques,
- * des dimensions du béton.

3. FACTEURS AFFECTANTS LA RÉSISTANCE

C. DEGRÉE D'HYDRATATION ET MÛRISSEMENT

2. Effet de l'humidité sur le mûrissement

- Quand l'humidité ambiante commence à diminuer, l'eau dans les pores capillaires commence à s'évaporer (HR diminue) → le taux d'hydratation diminue, peu d'eau libre dans les pores pour former des nouveaux produits d'hydratation.

3. FACTEURS AFFECTANTS LA RÉSISTANCE

C. DEGRÉE D'HYDRATATION ET MÛRISSEMENT

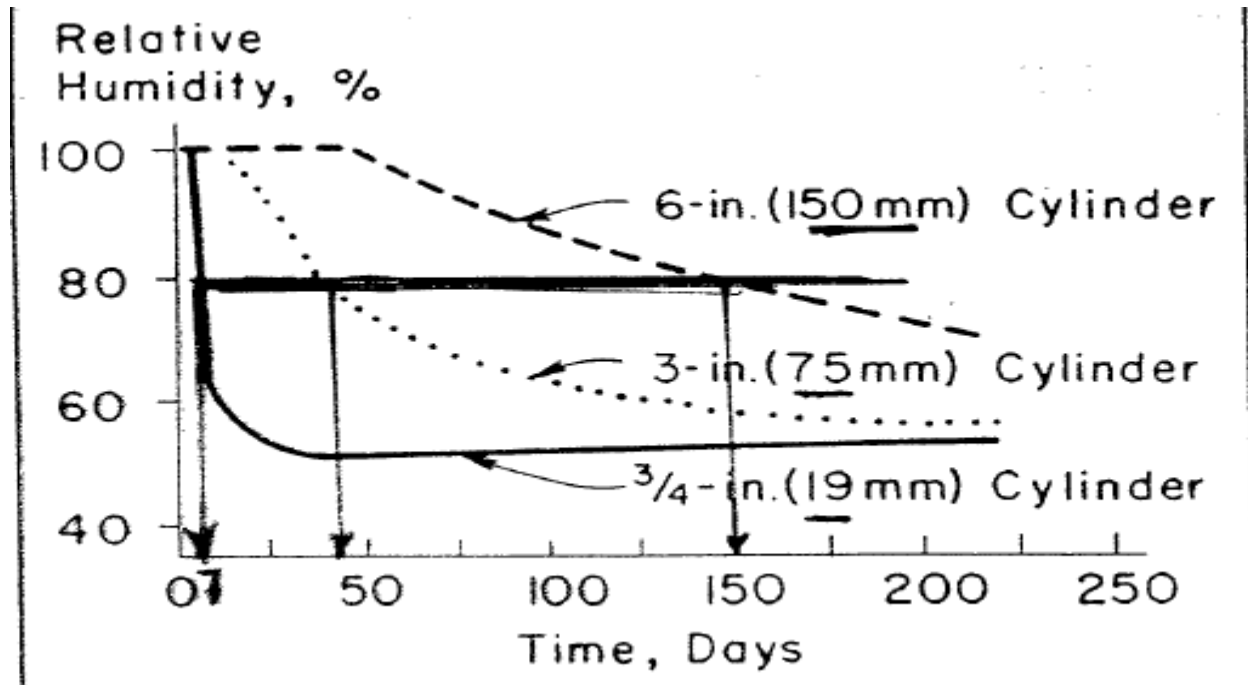
2. Effet de l'humidité sur le mûrissement

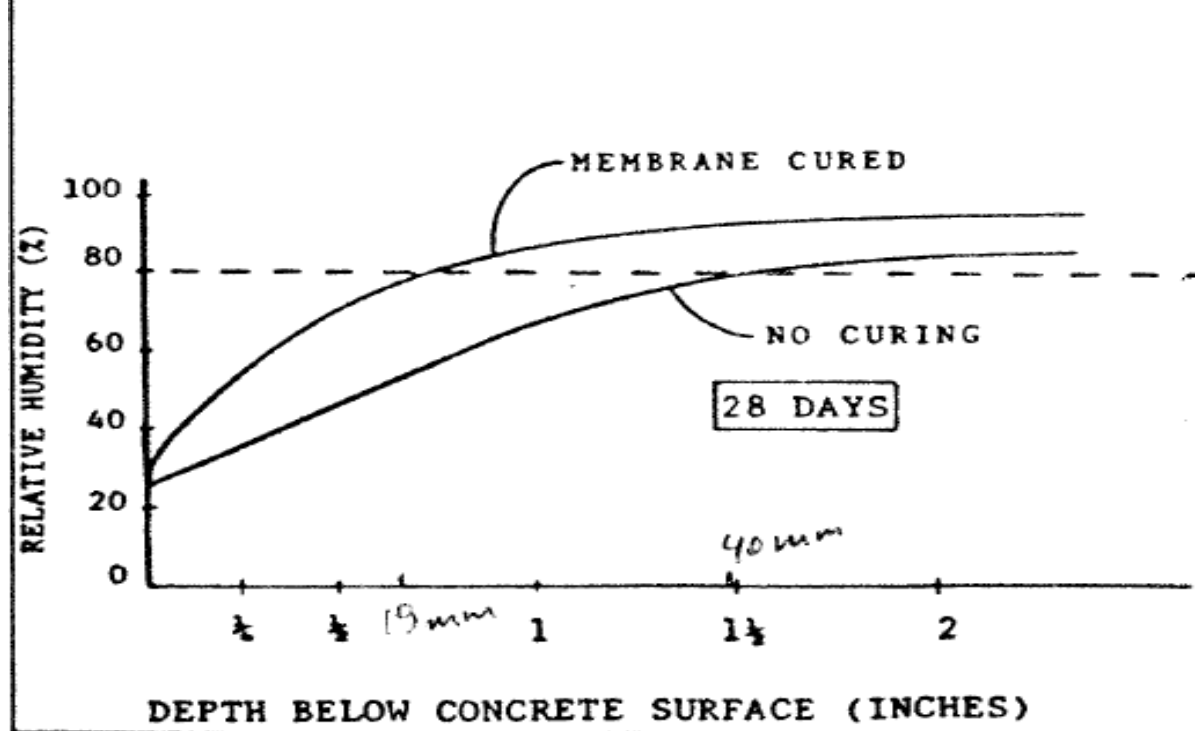
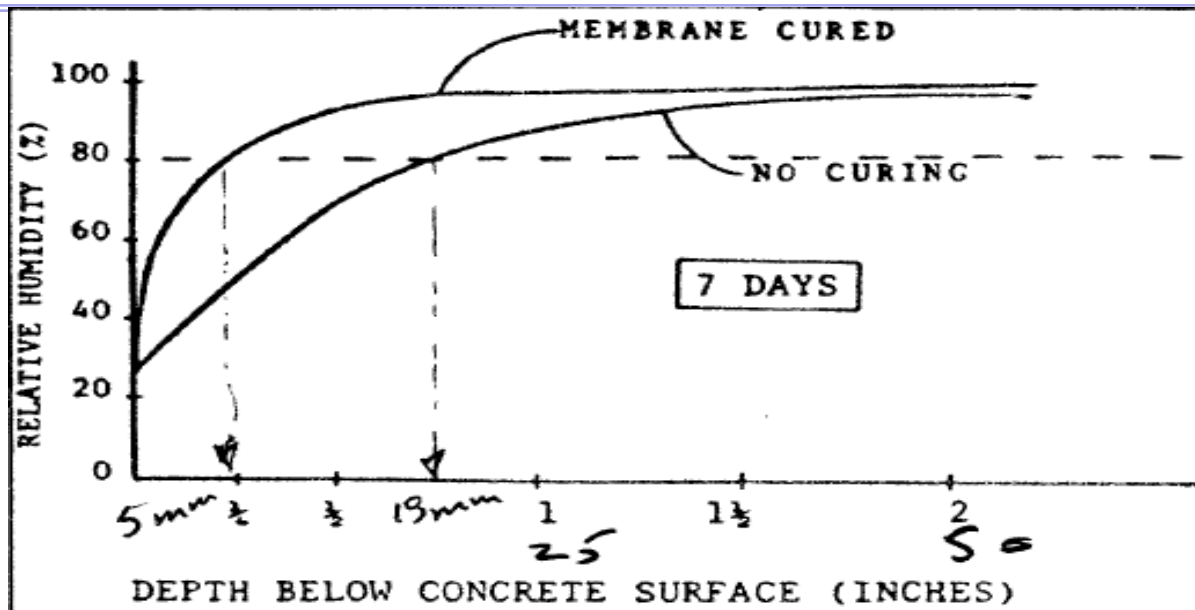
- On considère que l'hydratation s'arrête presque quand la vapeur d'eau dans les pores capillaires (HR) $< 80\%$ [POWERS (1947)].
- L'humidité dans le béton $\geq 80\%$ durant une période minimale pour que le béton atteigne la résistance et l'imperméabilité désirées.

3. FACTEURS AFFECTANTS LA RÉSISTANCE

C. DEGRÉE D'HYDRATATION ET MÛRISSEMENT

2. Effet de l'humidité sur le mûrissement





3. FACTEURS AFFECTANTS LA RÉSISTANCE

C. DEGRÉE D'HYDRATATION ET MÛRISSEMENT

2. Effet de l'humidité sur le mûrissement

- On peut empêcher l'évaporation de l'eau par :
 - * l'arrosage,
 - * l'immersion des surfaces de béton dans l'eau,
 - * le recouvrement des surfaces avec des toiles de jute humide, des feuilles de plastique ou des papiers imperméables (**non absorbant!!**)

3. FACTEURS AFFECTANTS LA RÉSISTANCE

C. DEGRÉE D'HYDRATATION ET MÛRISSEMENT

2. Effet de l'humidité sur le mûrissement

- Pour minimiser le taux de perte d'humidité:
 - * diminuer la température ambiante!!
 - * augmenter l'humidité ambiante!!
 - * diminuer la vitesse de l'air autour de béton et
 - * diminuer le rapport surface/volume d'un béton

3. FACTEURS AFFECTANTS LA RÉSISTANCE

C. DEGRÉE D'HYDRATATION ET MÛRISSEMENT

- MONFORE (1963) a démontré que la perte d'humidité au centre d'un cylindre diminue avec l'augmentation de son diamètre
- CARRIER (1986) a démontré que seulement la partie supérieure d'une surface de béton sèche quand la perte d'humidité n'est pas entravée.

3. FACTEURS AFFECTANTS LA RÉSISTANCE

C. DEGRÉE D'HYDRATATION ET MÛRISSEMENT

- Quand la perte d'humidité est empêchée par un produit de cure installé après la mise en place, les parties du béton qui avaient une HR $\leq 80\%$ étaient dans les 5 et 19 mm supérieurs après 7 et 28 d de séchage

CARRIER (1986)

3. FACTEURS AFFECTANTS LA RÉSISTANCE

C. DEGRÉE D'HYDRATATION ET MÛRISSEMENT

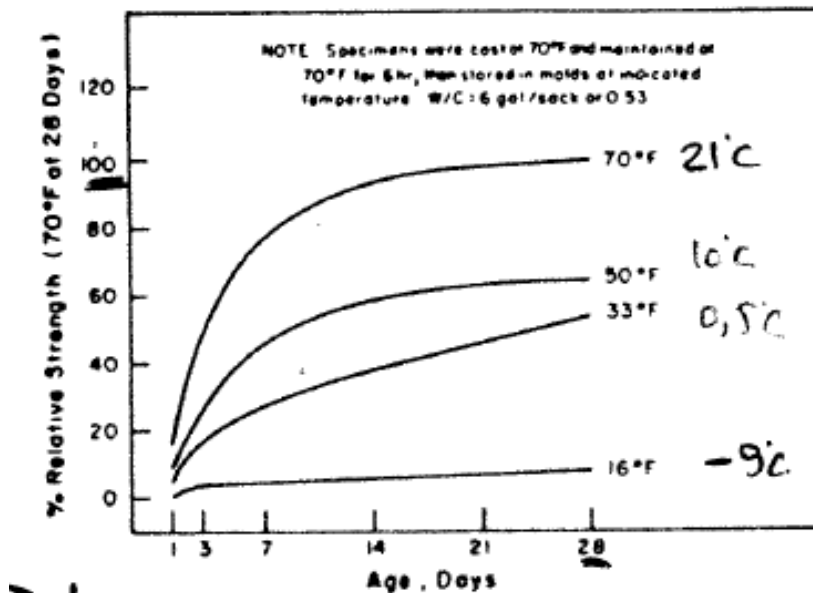
- Quand la perte d'humidité est empêchée par un produit de cure installé après la mise en place, les parties du béton qui avaient une HR $\leq 80\%$ étaient dans les 5 et 19 mm supérieurs après 7 et 28 d de séchage

CARRIER (1986)

3. FACTEURS AFFECTANTS LA RÉSISTANCE

C. DEGRÉE D'HYDRATATION ET MÛRISSEMENT

3. *Effet de la température*



E/C = 0.53

6h à 21°C puis à T indiquée

PÉRIODE MINIMALE DE MÛRISSEMENT

- *ACNOR A23.1 exige* de chauffer l'air ambiant afin d'atteindre une température de mûrissement favorable (15 à 25°C) quand la température ambiante est basse (fournaise à gaz ou au mazout, par de la vapeur, ...).
- Spécification: une cure des surfaces de béton se fait dans des conditions **humide** pendant la plus courte de 2 périodes :

PÉRIODE MINIMALE DE MÛRISSEMENT

- * 3d à une température supérieure à 15°C ou
 - * le temps nécessaire pour atteindre 35% de f'c à 28 d.
- Il faut débiter cette cure (humidité et températures contrôlées) une fois que la prise initiale est atteinte (pour ne pas endommager la surface), mais avant que le béton commence à sécher.

PÉRIODE MINIMALE DE MÛRISSEMENT

- Lorsque le béton est utilisé dans des **dalles sur le sol** et dans les bétons **structuraux**, la durée minimale de la cure initiale humide à une température ambiante supérieur à 15°C doit être la plus courte de :
 - * 7d minimum ou
 - * le temps nécessaire pour atteindre 70% de f'_c ou f_r à 28 d.

PÉRIODE MINIMALE DE MÛRISSEMENT

- La norme spécifie des durées de **cure humide supplémentaires** pour assurer la **durabilité** :
 - * 4d consécutifs supplémentaires à une température $\geq 15^{\circ}\text{C}$ ou
 - * le temps nécessaire pour atteindre 70% de f'_c à 28 d.

PÉRIODE MINIMALE DE MÛRISSEMENT

- Si un béton à **haute résistance initiale** est utilisé pour accélérer le temps de prise et la résistance, la période de mûrissement peut être réduite de 7 à 3d à condition de maintenir une température $\geq 15^{\circ}\text{C}$ durant cette période.
- Pour les **bétons de masse** (piliers de ponts, barrages, colonnes, poutres, ...), la période de mûrissement doit durer au moins:

PÉRIODE MINIMALE DE MÛRISSEMENT

- * 2 semaines pour le béton non armé qui ne contient pas un ajout ou pouzzolane
- * 3 semaines pour le béton non armé qui contient un pouzzolane.

PÉRIODE MINIMALE DE MÛRISSEMENT

- Pour qu'un béton résiste aux **sels de déglacage**, il faut que :
 - * la période de mûrissement initiale soit suffisante pour permettre au béton d'atteindre toute sa résistance, et
 - * que la surface du béton sèche pendant au moins un mois avant qu'elle soit exposée aux sels de déglacage.

PÉRIODE MINIMALE DE MÛRISSEMENT

- Pour qu'un béton résiste aux **sels de déglacage**, il faut que :
 - * la période de mûrissement initiale soit suffisante pour permettre au béton d'atteindre toute sa résistance, et
 - * que la surface du béton sèche pendant au moins un mois avant qu'elle soit exposée aux sels de déglacage.

3. FACTEURS AFFECTANTS LA RÉSISTANCE

D. EFFET DES PARAMÈTRES D'ESSAIS

La mesure de la résistance réelle d'un échantillon de béton est influencée par:

- l'humidité et la température de l'échantillon,
- le taux de chargement,
- la dimension et la forme des échantillons,
- le type de moules,
- la méthode de coiffe et le matériau de coiffe.

3. FACTEURS AFFECTANTS LA RÉSISTANCE

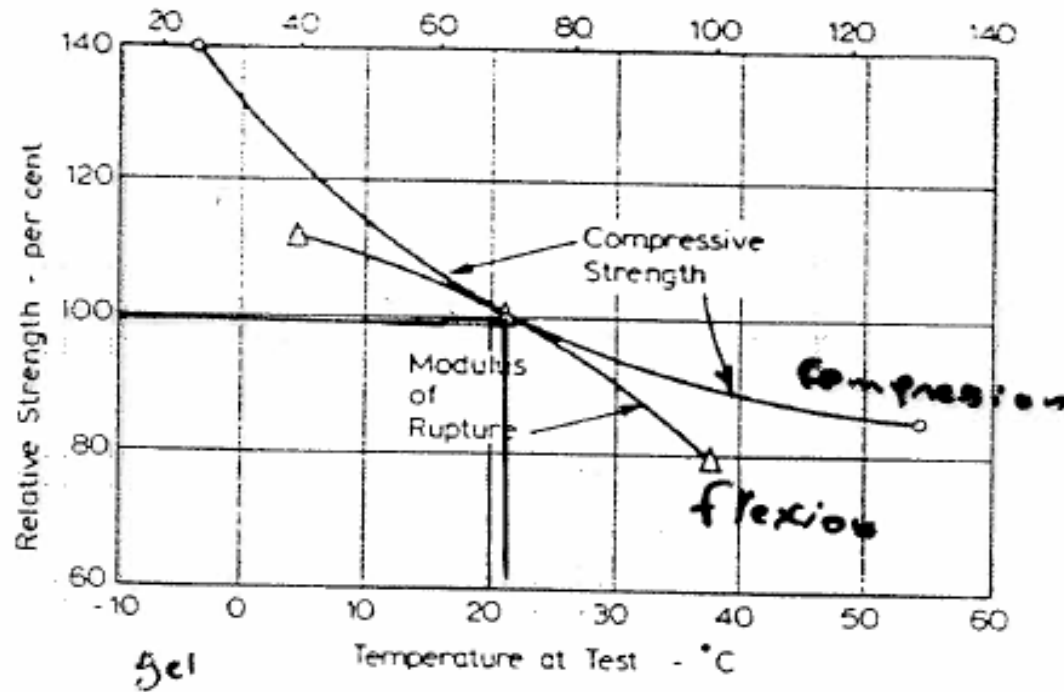
D. EFFET DES PARAMÈTRES D'ESSAIS

1. Humidité et température des échantillons

- Les **variations** de résistance des bétons mouillés < bétons secs → les normes exigent que les échantillons soient testés **immédiatement** après qu'ils ont été enlevés de l'eau.
- **f_c d'un béton sec > d'un béton saturé**
 - * ~ 10% quand le béton est complètement sec
 - * ~ 5% quand la durée de séchage est d'environ 6 h.

3. FACTEURS AFFECTANTS LA RÉSISTANCE

3. *Effet de la température*



[NEVILLE (1983b)]

3. FACTEURS AFFECTANTS LA RÉSISTANCE

D. EFFET DES PARAMÈTRES D'ESSAIS

- * La dilatation des C-S-H par l'eau adsorbé diminue les forces de cohésion entre les solides et augmente la **pression de disjonction** entre les cristaux de C-S-H. **Alors que:**
- * L'évaporation de l'eau adsorbée entre les cristaux de C-S-H permet à ces solides de **s'approcher les un des autres** et la force de cohésion entre ces cristaux augmente.

3. FACTEURS AFFECTANTS LA RÉSISTANCE

D. EFFET DES PARAMÈTRES D'ESSAIS

2. Taux de chargement

- La résistance en compression maximale du béton diminue quand le taux d'application de la charge est faible!!
 - déformation additionnelle imposée par le **fluage** du béton lorsqu'il est chargé lentement, ce qui diminue la déformation maximale qui peut être atteint avant la rupture.

3. FACTEURS AFFECTANTS LA RÉSISTANCE

D. EFFET DES PARAMÈTRES D'ESSAIS

2. Taux de chargement

ASTM C39 spécifie 8 à 21 MPa/min pour l'essai de compression.

3. FACTEURS AFFECTANTS LA RÉSISTANCE

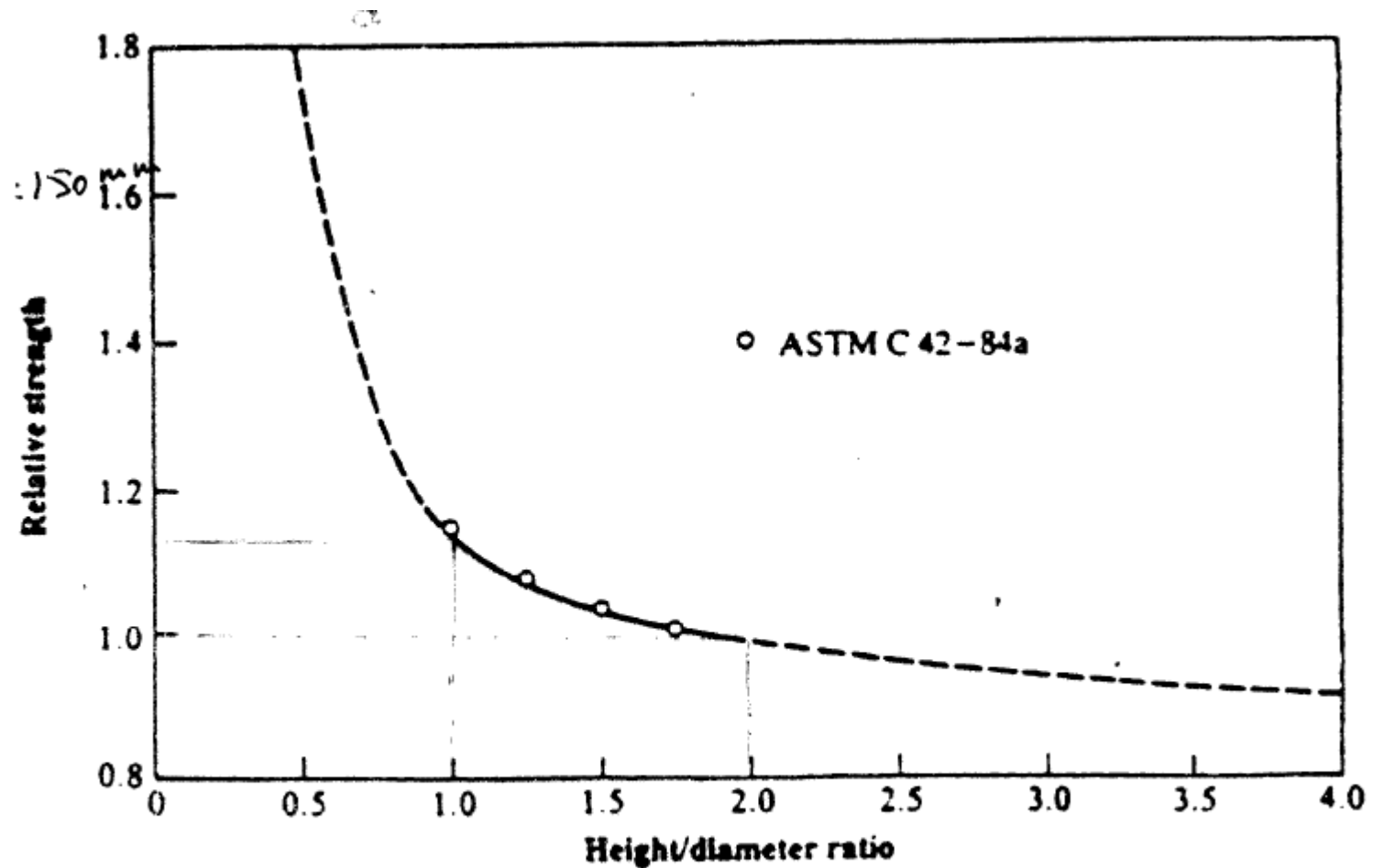
D. EFFET DES PARAMÈTRES D'ESSAIS

2. Taux de chargement

ASTM C39 spécifie 8 à 21 MPa/min pour l'essai de compression.

D. EFFET DES PARAMÈTRES D'ESSAIS

2. Effet du L/d (élancement)



L'effet d'élancement sur la résistance apparente en compression

3. FACTEURS AFFECTANTS LA RÉSISTANCE

D. EFFET DES PARAMÈTRES D'ESSAIS

2. Forme d'échantillon

Courbe!!

Rappel (cours passé)

SOURCE DE RÉSISTANCE

1. Effet filler -- réduction des pores – deg hydr.
2. Les forces physiques de surface d'attraction (Van der Waals) – surfaces des solides.
 - * Forces de surface de C-S-H > CH (surface spécifique)
 - * Dans une pâte complètement hydratée le volume de C-S-H > CH (50-60% vs 20-25% du volume de solides) – ajouts minéraux!!
3. Cristaux de l'étringite et de la monosulfoaluminate ont des surfaces spécifiques élevées – volume limité.

Rappel (cours passé)

SOURCE DE FAIBLESSE

Vides -- les bulles d'air, les microfissures et les grands pores capillaires (> 50 nm).

La porosité capillaire nulle?? Est-ce possible?

($\alpha = 100\%$, $E/C < 0,3$)

Résistance vs. la porosité des matériaux homogènes :

$$S = S_0 e^{-kp}$$

$S = f'c$, $S_0 = f'c$ correspondant à une porosité nulle,

$p =$ porosité, $k =$ constante

Rappel (cours passé)

FACTEURS AFFECTANTS LA RÉSISTANCE

A. PARAMÈTRES DE FORMULATION

1. *Rapport E/C* Loi de Abram (1918) :

$$f_c = k_1 \div (k_2)E/C$$

k_1 et k_2 sont des constantes

2. *Volume d'air* L'air augmente la porosité et diminue la résistance.

$$f_c = k [1 \div (1 + V_e/V_c)]^2$$

Rappel (cours passé)

FACTEURS AFFECTANTS LA RÉSISTANCE

A. PARAMÈTRES DE FORMULATION

3. *Composition et finesse du ciment*

C3S, bC2S, ...

4. *Pouzzolane*

- du type et de la teneur

- mode d'utilisation

- mûrissement (mode, durée, temp.),

5. *Caractéristiques des granulats*

- le rapport E/C, adhérence et ZT

- résistance des granulats

Rappel (cours passé)

FACTEURS AFFECTANTS LA RÉSISTANCE

A. PARAMÈTRES DE FORMULATION

5. Caractéristiques des granulats

- granulométrie
- nature de la surface
- composition minéralogique des granulats

Rappel (cours passé)

FACTEURS AFFECTANTS LA RÉSISTANCE

B. EFFET DE LA COMPACTITÉ SUR LA RÉSISTANCE

- La consolidation du béton - libère les bulles d'air piégées
- vibration vs. viscosité du béton

Rappel (cours passé)

FACTEURS AFFECTANTS LA RÉSISTANCE

C. DEGRÉ D'HYDRATATION ET MÛRISSEMENT

- empêcher la perte d'humidité et le séchage rapide,
- protéger suffisamment le béton pendant un temps défini contre le gel et les températures anormalement élevées).

1. Effet de la durée du mûrissement

2. Effet de l'humidité sur le mûrissement

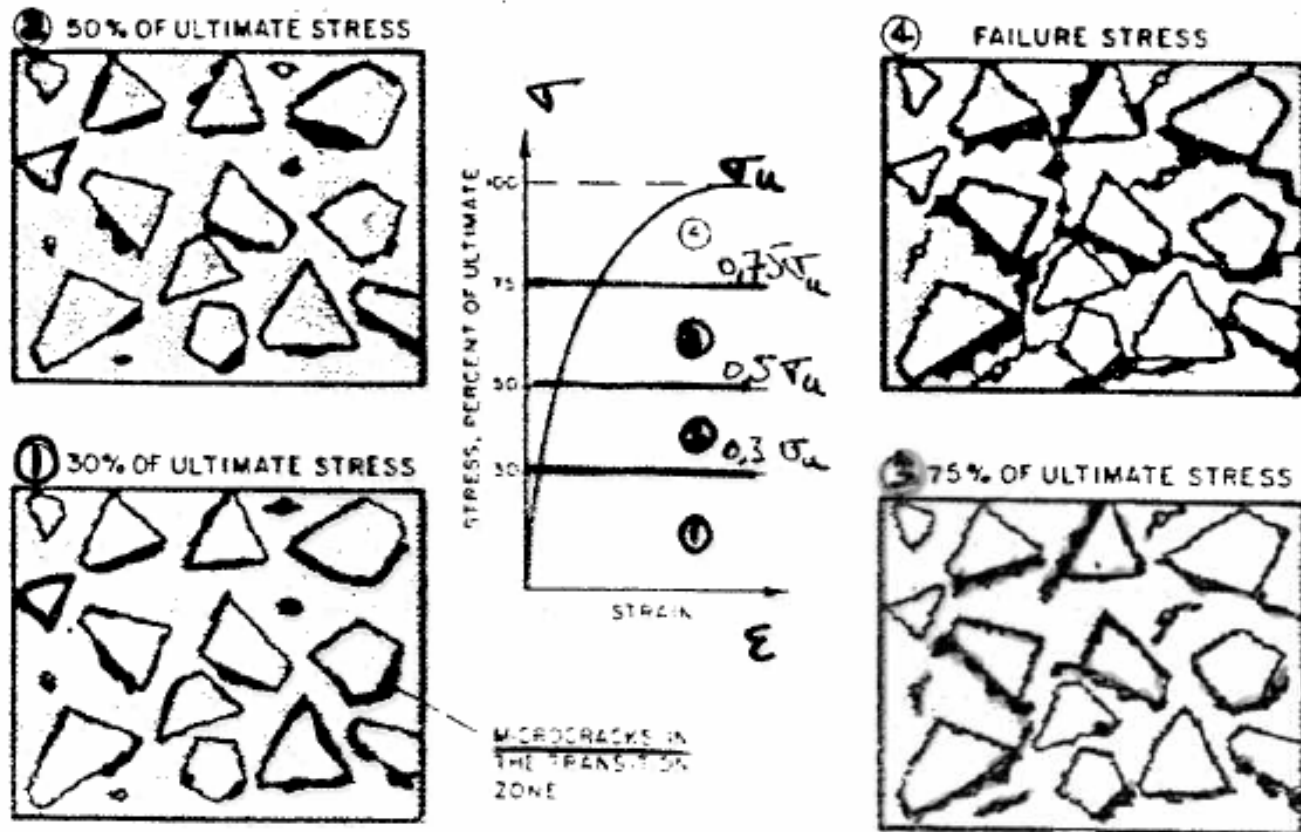
Rappel (cours passé)

FACTEURS AFFECTANTS LA RÉSISTANCE

D. EFFET DES PARAMÈTRES D'ESSAIS

- humidité et la température de l'échantillon
- taux de chargement (ASTM C39: 8-21 MPa/min)
- dimension et la forme des échantillons,
- type de moules,
- la méthode de coiffe et le matériau de coiffe.

COMPORTEMENT UNIAXIAL EN COMPRESSION



- Le béton contient des microfissures localisées dans la Z.T. (accumulation d'eau sous gros granulat par ressuage interne, par tassement, ...).
- La densité et la dimension de ces microfissures dépendent de la qualité de liaison entre les granulats et la pâte de ciment (influencée par les degrés d'hydratation et de consolidation, rapport E/C, ...).
- Selon la qualité de la Z.T., des microfissures peuvent y exister à cause des déformations différentielles entre la pâte et les granulats (à cause du retrait et des changements de température, $\Delta\alpha$, ΔE ...

– $\sigma < 0,3 \sigma_m$ -- microfissures stables courbe linéaire, E et μ sont constants, pas déformations permanentes.

- $0,3 \sigma_m < s < 0,5 \sigma_m$ -- propagation, densité, nombre et longueur des microfissures commencent à augmenter dans la Z.T.

1. La courbe commence à dévier de la linéarité et E diminue.
2. déformations permanentes longitudinales mais pas transversales.
3. Les microfissures restent stables (limitées à la ZT) si $\sigma < 0,5 \sigma_m$

- $0,5 \sigma_m < \sigma < 0,75 \sigma_m$

Les microfissures deviennent instables et commencent à se propager à la périphérie des granulats et dans la pâte de ciment.

À $0,75 \sigma_m$ leur nombre et degré de propagation augmentent rapidement.

$E \downarrow$

Le coefficient de Poisson et déformations permanentes \uparrow

- $0,75 \sigma_m < \sigma < 0,90 \sigma_m$

Le taux de déformation devient très élevé et les microfissures commencent à grandir et à se propager avec une augmentation du volume, même si la charge est maintenue.

$E \downarrow$

$\nu \uparrow$ pour se rapprocher de 0,50.

Les déformations longitudinales et transversales \uparrow jusqu'à 0,0005 et 0,0001, respectivement. Les fissures dans la Z.T. et pâte commencent à se joindre
-----> le béton se casse.

- $0,75 \sigma_m < \sigma < 0,90 \sigma_m$

Le taux de déformation devient très élevé et les microfissures commencent à grandir et à se propager avec une augmentation du volume, même si la charge est maintenue.

$E \downarrow$

$\nu \uparrow$ pour se rapprocher de 0,50.

Les déformations longitudinales et transversales \uparrow jusqu'à 0,0005 et 0,0001, respectivement. Les fissures dans la Z.T. et pâte commencent à se joindre
-----> le béton se casse

Courbes σ - ε du béton (graph)

- (a) charge et déformation axiales,
- (b) déformation volumétriques [CHEN (1982)]

Ces courbes sont presque linéaires jusqu'à $\sigma \sim 0,3\sigma$ rupture.

La déformation volumétrique est "quasi-linéaire" jusqu'à un niveau de **contrainte critique** ($0,75\sigma$ rupture) où la valeur de la déformation volumétrique ($\varepsilon_V = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$) devient minimale.

Courbes σ - ε du béton (graphe)

- Cette valeur correspond au niveau du chargement pour lequel la diminution de volume est maximale (consolidation du béton, fermeture des microfissures initiales, diminution de la porosité, etc.).
- Quand $\sigma >$ contrainte critique, les microfissures deviennent instables et propagent rapidement.
- Quand $\sigma >$ contrainte critique, les microfissures qui sont instables commencent à se propager rapidement
– RUPTURE!!!

Courbes σ - ε du béton (graphe)

- Cette valeur correspond au niveau du chargement pour lequel la diminution de volume est maximale (consolidation du béton, fermeture des microfissures initiales, diminution de la porosité, etc.).
- Quand $\sigma >$ contrainte critique, les microfissures deviennent instables et propagent rapidement.
- Quand $\sigma >$ contrainte critique, les microfissures qui sont instables commencent à se propager rapidement pour causer la **RUPTURE!!!**
- RÜSCH (1960) a rapporté que pour un béton ayant une $f'c = 35$ MPa à 56 d, $\sigma_{crt} = 80\%$ de la résis. max

RÉSISTANCE EN TRACTION DIRECTE ($f_t = P / A$)

Le chargement direct d'un échantillon en traction est compliqué, coûteux, et délicat à réaliser. Pour le faire, Il faut [GORISSE (1982)] :

- scier les 2 extrémités de l'éprouvette pour éliminer le béton faible,
- coller des plaques métalliques aux extrémités et
- les attacher parfaitement centrées à la machine de traction pour éviter les flexion partielles, contraintes secondaires par un système de mâchoire ----> peut sous-estimer la résistance réelle à la traction.

RÉSISTANCE EN TRACTION DIRECTE ($f_t = P / A$)

Pour un béton soumis à un essai de traction:

- la courbe σ - ε est quasi-linéaire jusqu'à la rupture,
- les fissures sont stables à des contraintes moins élevées et pour des durées plus courtes que celles du béton chargé en compression,
- la propagation des fissures (surfaces de rupture) se fait dans la direction perpendiculaire à la direction de l'effort de traction.
- L'initiation de chaque fissure réduit donc la surface qui peut résister à la charge de traction.
- Les fissures peuvent se propager rapidement, et la jointure de quelques fissures peut causer la rupture.

RÉSISTANCE EN TRACTION DIRECTE ($f_t = P / A$)

Pour un béton soumis à un essai de traction:

- La résistance du béton à la traction dépend de l'adhérence entre le mortier et les granulats ----> la résistance du béton en traction est améliorée par l'utilisation des granulats concassés, surfaces rugueuses et pas sales.
- f_t du béton contenant des granulats concassés est 8% supérieure au même béton contenant des granulats naturels roulés lisses [DEWAR (1964)].

RELATIONS ENTRE F'C ET FT

1. THORENFELDT (1986):

$$f_t = 0,3 (f_{cc})^{0,6} \quad \text{en MPa}$$

2. PRICE (1951b): pour des bétons ayant des fcc de:

7 à 14 MPa $f_t \sim 10 \text{ à } 11\% f_{cc}$

21 à 34 MPa $f_t \sim 8\% f_{cc}$

48 à 62 MPa $f_t \sim 7 \text{ à } 7,5\% f_{cc}$

RELATIONS ENTRE F'C ET FT

- Le rapport f_t/f_{cc} augmente par l'amélioration de la qualité de Z.T. (ajouts minéraux, hydratation, utilisation de granulats réactifs, etc.).
- Les granulats calcaire peuvent réagir avec le CH présents en grande concentration dans le Z.T. pour former des carbonates de calcium qui diminue la porosité de l'interface et augmente sa résistance.

RÉSISTANCE EN TRACTION PAR FENDAGE (f_{sp})

- L'essai brésilien est simple et peut donner des valeurs **plus proches** de la résistance en traction directe que celui de l'essai de traction par flexion.
 - ASTM C 496 -- 150 x 300 mm et des règles de contre-plaqué de 3 mm d'épaisseur et de 25 mm de largeur (1/12 de diamètre d'éprouvette) pour répartir la charge sur l'éprouvette.
- NB: f_{sp} peut diminuer 8% si la charge n'est pas bien répartie.**

RÉSISTANCE EN TRACTION PAR FENDAGE (f_{sp})

- L'effort de compression appliqué sur une largeur de $D/12$ développe des contraintes de compression très élevées près des deux extrémités car il existe des contraintes de compression verticales élevées et des restrictions latérales qui exigent des efforts biaxiaux.
- Dans environ 80% de diamètre, on obtient des contraintes de traction.
- La résistance à la traction par fendage (f_{sp}) est calculée comme : $f_{sp} = 2 P / \pi L D$

RELATIONS EMPIRIQUES

CARRASQUILLO et coll. (1981):

Pour $21 < f_c < 83$ MPa

$$f_{sp} = 0,54 (f_c)^{0,5} \quad \text{en MPa}$$

RAPHAEL (1984):

Pour des bétons $f_c < 57$ MPa :

$$f_{sp} = 0,313 (f_c)^{0,667} \quad \text{en MPa}$$

RELATIONS EMPIRIQUES

OLUOKUN (1991) a analysé 566 données:

pour $f_c < 55$ MPa

$$f_{sp} = 1,38 (f_{cc})^{0,69} \quad \text{en psi}$$

ACI 318 (1981):

pour $14 < f_c < 41$ MPa

$$f_{sp} = 6,7 (f_{cc})^{0,50} \quad \text{en psi}$$

RAPHAEL (1984):

pour $f_c < 57$ MPa

$$f_{sp} = 0,313 (f_{cc})^{0,667} \quad \text{en MPa}$$

RELATIONS EMPIRIQUES

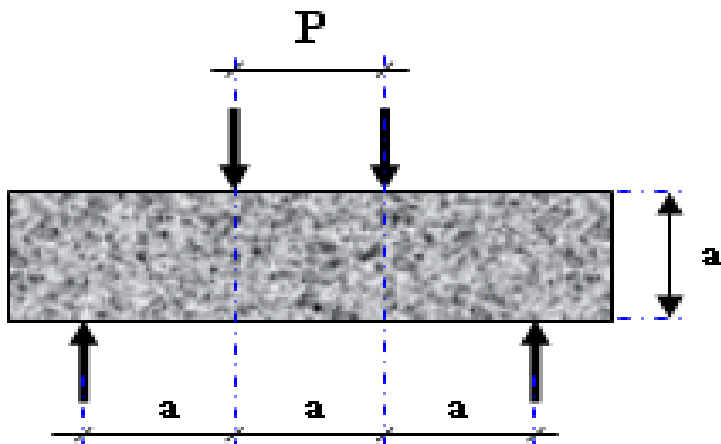
AHMAD et SHAH (1985) :

pour $f_c < 84$ MPa

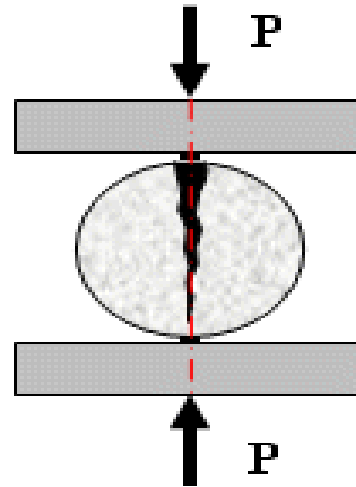
$$f_{sp} = 0,462 (f_{cc})^{0,55} \quad \text{en MPa}$$

RÉSISTANCE EN TRACTION-FLEXION

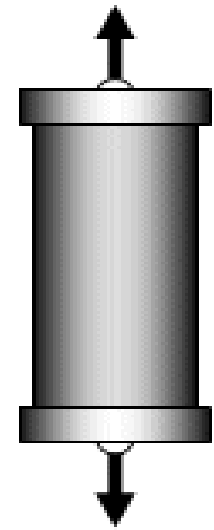
L'essai normalisé en flexion (ASTM C 78) consiste à rompre en flexion une éprouvette prismatique de longueur L , de hauteur $d = L/3$ et de côté b .



A. Essai de traction par flexion



B. Essai de traction par fendage



C. Essai de traction direct

RÉSISTANCE EN TRACTION-FLEXION

- Echantillons: 100 x 100 x 350 mm (150 x 150 x 500 mm)

- Pour une charge totale appliquée P, le moment de flexion entre les deux points d'application de la charge sera:

$$\mathbf{M = P L / 6}$$

- Si la fissuration et la fracture se produisent entre les 2 points d'application de charge, la contrainte de traction correspondante sur la fibre inférieure (f_r) sera :

$$\mathbf{f_r = M c / I = P L / b d^2}$$

RÉSISTANCE EN TRACTION-FLEXION

- Si la fissuration se trouve à une distance « a » $< 0,05 L$ en-dehors de la section située entre les 2 points d'application de charge, f_r est calculé par:

$$f_r = 3 P a / b d^2$$

- Si la valeur $(L/3 - a) > 0,05 L$, l'essai doit être rejeté.

REMARQUES

D'habitude, la mesure de la résistance à la traction par l'essai de flexion donne une **valeur 40 à 100%** > résistance de traction directe (la dernière pour des bétons faibles).

Explications:

1. Il est difficile de mesurer la charge correspondant à l'apparition de la première fissure (presqu'invisibles) ----> la charge maximale P utilisée pour calculer la résistance > de celle responsable de fissuration initiale.

2. À cause de la plastification du béton dans la phase de pré-rupture, la distribution des contraintes en traction n'est plus linéaire comme on le supposé dans les lois de l'élasticité

MODULE D'ÉLASTICITÉ DU BÉTON

Le MOE longitudinal est souvent déterminé en mesurant la pente de la courbe σ - ε dans sa partie linéaire (40% de la charge max) pour une éprouvette chargée uniaxialement en compression.

L'essai est de courte durée (~ 5 min) pour éviter des déformations due au fluage.

MODULE D'ÉLASTICITÉ DU BÉTON

1. **MOE sécant** est déterminé par la pente d'une ligne joignant l'origine et un point sur le courbe σ - ε (30% à 50%)

ASTM: 40% de la contrainte de rupture

BS: 33% de la contrainte de rupture.

NB) Il faut spécifier le % de la charge de rupture à laquelle le MOE sécant est déterminé.

2. **MOE de *chord*** correspond à la pente d'un trait joignant la point qui correspond à 40% de contrainte de rupture et le point où la déformation longitudinale est de 50×10^{-6} . Cette translation horizontale de l'origine est faite pour corriger la concavité initiale de la courbe s-e (ASTM C469).

MODULE D'ÉLASTICITÉ DU BÉTON

3. MOE tangentiel qui correspond à la pente de la tangente à la courbe σ - ε dans n'importe quel endroit.

- le MOE dynamique = en appliquant très rapidement une très faible charge.

- Le MOE dynamique est aussi mesuré à l'aide d'un **essai résonance** qui consiste à mesurer la vitesse du son à travers le béton (ASTM C 215).

MODULE D'ÉLASTICITÉ DU BÉTON

- Le MOE dynamique est approximativement égal au MOE tangentiel initiale déterminé par l'essai statique qui est plus grand que le MOE sécant.
- On peut mesurer le MOE par l'essai de **flexion** en mesurant la déflexion (théorie d'élasticité). Pour une poutre chargé par un charge concentré situé en son milieu, le MOE est calculé comme suit :

$$E = PL^3/(48\delta I)$$

où δ = la défection au milieu de la poutre,
 L = la distance entre les deux appuis,
 P = charge et I = moment d'inertie de la section.

FORMULES EMPIRIQUE POUR ESTIMER MOE DU BÉTON

MARTINEZ et coll. (1982):

- Btons de densité normale
- f'cc comprises entre 21 et 83 MPa

$$E_c = (3320 \sqrt{f_{cc}} + 6900) \text{ en Mpa}$$

à l'origine cette corrélation était:

$$E_c = (3320 \sqrt{f_{cc}} + 6900) (\rho/2346)^{1,5} \text{ en MPa et kg/m}^3$$

La comité ACI 318:

$$E_c = 0,043 \rho^{1,5} (f_{cc})^{0,5} \text{ en MPa et kg/m}^3$$

Bétons légers CEB (1990):

$$E_c = 1,6 \rho^2 (f_{cc,k} + 8)^{0,33} \text{ en MPa et kg/m}^3$$

FACTEURS QUI INFLUENCENT LE MOE

1. Effet de gros granulats

- * Le MOE de granulat affecte largement le MOE du béton;
- * la fraction volumétrique de granulat affecte le MOE du béton;
- * la porosité de gros granulat -- rigidité et son MOE;
- * MOE d'un béton contenant des granulats légers et poreux ~ 50 à 75% du MOE du béton de densité normale de même résistance
- * déformations différentielles entre les granulats et la pâte > concentration des contraintes élevées dans la Z.T.

FACTEURS QUI INFLUENCENT LE MOE

2. *Pâte de Ciment*

- Des valeurs typiques pour le MOE de la pâte sont de l'ordre de 7 à 28 GPa ce qui est proche au celui des granulats légers.
- La rigidité de la pâte de ciment hydratée est influencée par sa porosité (degré d'hydratation, rapport E/L, volume d'air, ajouts minéraux, degré de consolidation, ...).
- Le taux d'augmentation du MOE avec le temps de durcissement est moins élevé que celui de $f'c$.

FACTEURS QUI INFLUENCENT LE MOE

3. *L'adhérence entre le mortier et gros granulats*

- * l'accumulations d'eau et des bulles d'air piégées;
- * les hautes concentrations des cristaux faibles de CH orientées;
- * les grandes concentrations de microfissures causées par les contraintes à cause du retrait, de sollicitations élastiques ou thermiques

FACTEURS QUI INFLUENCENT LE MOE

4. Paramètres d'essais

État de saturation lors de l'essai. L'eau dans le béton mouillé peut supporter une charge et le séchage peut créer des microfissures dans la Z.T.

MOE béton saturé ~ 115% MOE béton sec [MEHTA (1986)]}.

Taux de montée en charge -- influence la vitesse de la propagation des microfissures et donc la pente de courbe $\sigma-\epsilon$.

FACTEURS QUI INFLUENCENT LE MOE

4. Paramètres d'essais

Quand le taux du chargement est instantané— la rigidité peut être de l'ordre de 15 à 20% plus grande que celle mesurée pendant un taux de chargement normal qui est de l'ordre de 15 MPa/min

Explication: les microfissures dans le béton ne peuvent pas se propager rapidement et on obtient une résistance et une rigidité plus élevées.

Durée de l'essai. Si la durée de l'essai est très longue, on risque d'avoir des déformations additionnelles à cause du fluage et de relaxation qui diminuent le MOE du béton.