



# Recommandations pour la maîtrise de la fissuration des voiles

*Philippe Bisch – EGIS INDUSTRIES*



Ministère  
de l'Écologie,  
du Développement  
durable  
et de l'Énergie

01/10/2015



When a more refined model is not available, the following expression for  $l_{s,max}$  may be used:

$$l_{s,max,\theta} = \left( \frac{\cos \theta}{l_{sx,k}} + \frac{\sin \theta}{l_{sy,k}} \right)^{-1} \quad (7.6-8)$$

where:  
 $\theta$  denotes the angle between the reinforcement in the x-direction and the direction of the principal tensile stress  
 $l_{sx,k}$ ,  $l_{sy,k}$  denote the slip lengths in the two orthogonal directions, calculated according to Eq. (7.6-4)

The design crack width can then be calculated from:

$$w_d = 2 \cdot l_{s,max,\theta} (\epsilon_{\perp} - \epsilon_{c,\perp}) \quad (7.6-9)$$

where:  
 $\epsilon_{\perp}$  and  $\epsilon_{c,\perp}$  represent the mean strain and the mean concrete strain, evaluated in the direction orthogonal to the crack (Figure 7.6-6).

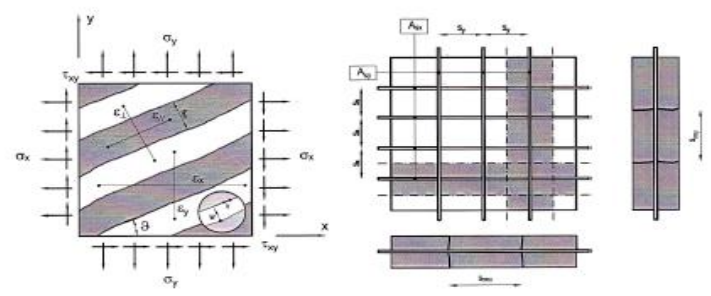


Figure 7.6-6: Basis for calculation of crack width for reinforcement deviating from the direction orthogonal to the crack.

### 7.6.4.4.3 Orthogonal reinforcement directions

If the cracks in a member reinforced in two orthogonal directions are expected to form at an angle which differs substantially ( $> 15^\circ$ ) from the direction of the reinforcement, the approximation by Eq. (7.6-8) and (7.6-9)

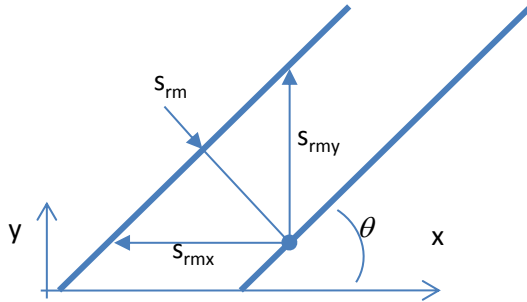
may be used to calculate  $l_{s,max}$  and  $w_d$ .

$$l_{s,max} = k \cdot c + \frac{1}{4} \cdot \frac{f_{ctm}}{\tau_{bms}} \cdot \frac{\phi_s}{\rho_{s,ef}} \quad (2)$$

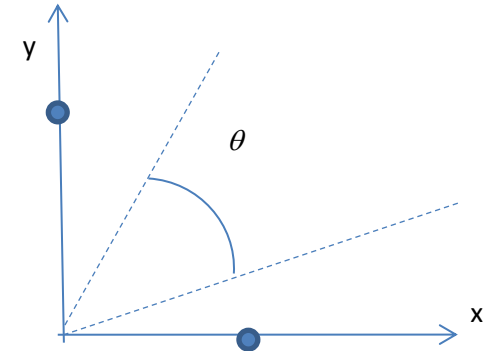
①

③

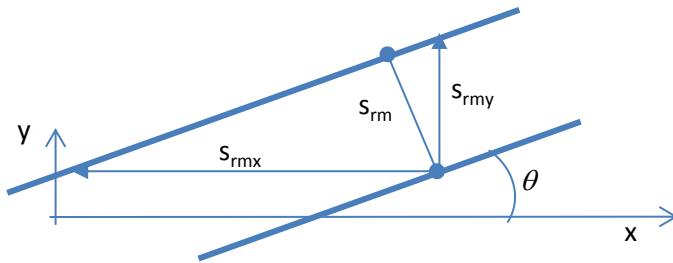
# 1 Validité de l'hypothèse de VECCHIO & COLLINS



$$s_{rm} = \left( \frac{\sin \theta}{s_{rmx}} + \frac{\cos \theta}{s_{rmy}} \right)^{-1}$$



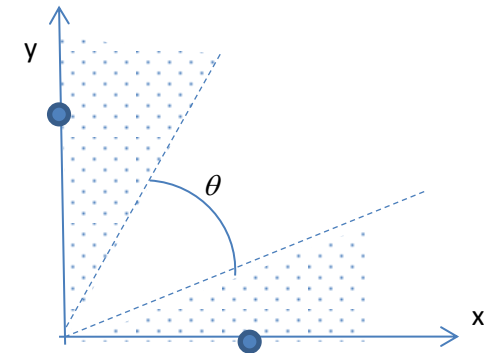
- Si  $s_{rmx}$  ET  $s_{rmy}$  SONT CONSIDÉRÉS COMME DES COMPOSANTES GÉOMÉTRIQUES, C'EST ÉVIDENT
- IL EST SUPPOSÉ QUE CE SONT LES ESPACEMENTS DE FISSURES DES TIRANTS FICTIFS DANS LES DIRECTIONS X ET Y
- C'EST ÉVIDENT QUAND  $\theta = 0^\circ$  ET  $\theta = 90^\circ$  (TRACTION PURE)
- CELA PEUT ÊTRE DÉMONTRÉ COMME UNE BONNE APPROXIMATION DANS UN LARGE DOMAINE DE VARIATION DE  $\theta$  QUAND IL Y A CISAILLEMENT ("Cracked Membrane Model")
- L'APPROXIMATION EST D'AUTANT MEILLEURE QUE L'ANGLE CORRESPOND À L'OPTIMUM DE RÉPARTITION DES ARMATURES



- **CETTE HYPOTHÈSE N'EST PAS ACCEPTABLE POUR LES PETITS ANGLES**
- **LA DISTRIBUTION DES BARRES EST DISCRÈTE POUR LES PETITS ANGLES**

⇒ **LA LIMITATION À 15° POUR L'ANGLE DE LA FISSURE EST TROP OPTIMISTE**

⇒ **MANQUE UN MODÈLE PHYSIQUE ADAPTÉ AUX PETITS ANGLES**



## ② Quelle(s) valeur(s) de l'enrobage $c$ ?

### LES CHOIX POSSIBLES POUR L'ENROBAGE SONT :

- LE SEUL ENROBAGE DE LA NAPPE EXTÉRIEURE
  - ⇒ LES SECTIONS EFFICACES SONT LES MÊMES DANS LES DEUX DIRECTIONS SI LES ARMATURES SONT IDENTIQUES
- L'ENROBAGE DE CHAQUE NAPPE EST PRIS EN COMPTE DANS LE CALCUL DE L'ESPACEMENT DANS CHAQUE DIRECTION
  - ⇒ LES SECTIONS EFFICACES (DONC LES ESPACEMENTS) SONT DIFFÉRENTES, MÊME SI LES ARMATURES SONT IDENTIQUES
- UN ENROBAGE MOYEN ENTRE LES DEUX NAPPES EST UTILISÉ POUR LE CALCUL DES ESPACEMENTS

→ Ces choix ont été comparés aux mesures sur les voiles CEOS.fr

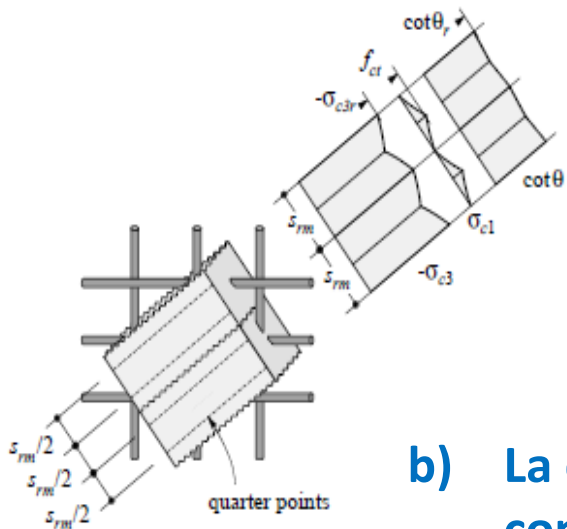
⇒ LES DEUX DERNIERS SONT ACCEPTABLES

- a) QUAND LE COMPORTEMENT DU BÉTON ARMÉ EST MODÉLISÉ FINEMENT, LES RÉSULTATS DU CALCUL MEF PEUVENT ÊTRE UTILISÉS DIRECTEMENT :

$$w_d = 2 \cdot l_{s,\max,\theta} (\varepsilon_{\perp} - \varepsilon_c)$$

LA PLUPART DES MODÈLES ACTUELS DONNENT DE BONS RÉSULTATS GLOBAUX, **MAIS** LES DÉFORMATIONS LOCALES NE SONT PAS TRÈS BIEN RESTITUÉES

- b) QUAND UN MODÈLE NE PEUT PAS REPRÉSENTER SUFFISAMMENT PRÉCISÉMENT LES DÉFORMATIONS LOCALES, ON PEUT BASER LE CALCUL SUR LES CONTRAINTES ; C'EST CE QUI EST FAIT DANS LES NORMES POUR LES TIRANTS ET LES POUTRES



## HYPOTHÈSES :

- a) Quand les actions considérées produisent la fissuration,  $\theta$  est déterminé par la direction principale des contraintes (MC10)
- b) La déformation est calculée à partir des contraintes en prenant en compte la participation du béton comme pour les tirants

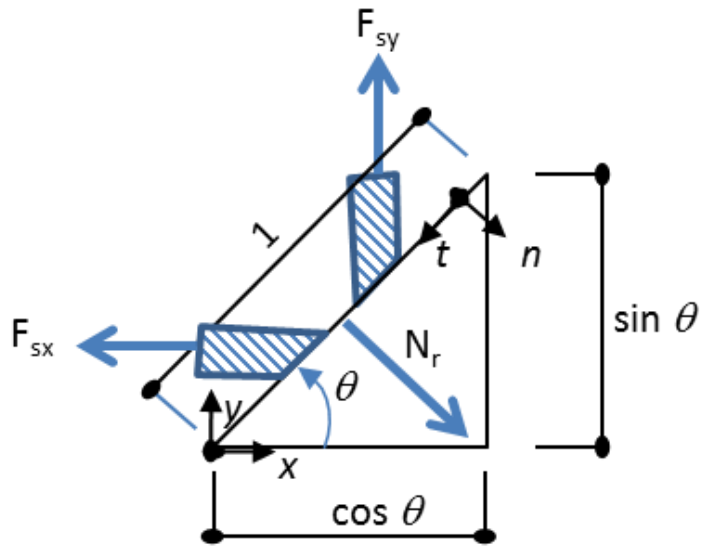
Pour les tirants :

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{1}{E_s} \left[ \underbrace{\sigma_{s2} - \frac{\beta f_{ct}}{\rho_{eff}}}_{\varepsilon_{sm}} \right] - \underbrace{\frac{\beta f_{ct} \alpha_e}{E_s}}_{\varepsilon_{cm}}$$

Contrainte dans l'armature au travers de la fissure

Participation du béton

- c)  $\varepsilon_{cm}$  est perpendiculaire à la fissure

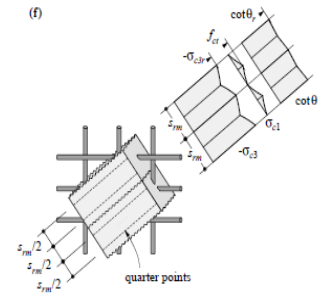


$N_r$  est obtenu à partir de la MEF :

$$N_r = N_{xx} \sin^2 \theta + N_{yy} \cos^2 \theta - 2N_{xy} \sin \theta \cos \theta$$

et est équilibré dans la fissure par la traction dans les armatures

L'équilibre tangentiel peut prendre en compte l'engrènement le long de la fissure



Entre fissures, la tension dans les armatures est réduite par la participation du béton. Finalement :

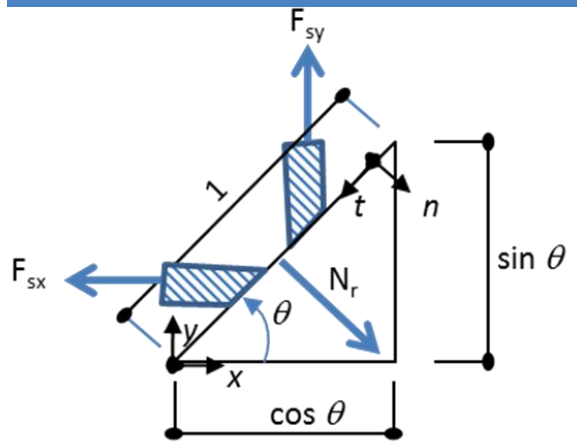
$$\left. \begin{aligned} F_{sy} \cos \theta + F_{sx} \sin \theta &= N_r - 2\beta f_{ct} h_{eff} \\ F_{sx} \cos \theta - F_{sy} \sin \theta & (+\varepsilon R_e) = 0 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{cases} F_{sx} = (N_r - 2\beta f_{ct} h_{eff}) \sin \theta \\ F_{sy} = (N_r - 2\beta f_{ct} h_{eff}) \cos \theta \end{cases}$$

Sur chaque face :

$$h_{eff} = \min(h/2; 2,5(c + \phi/2))$$

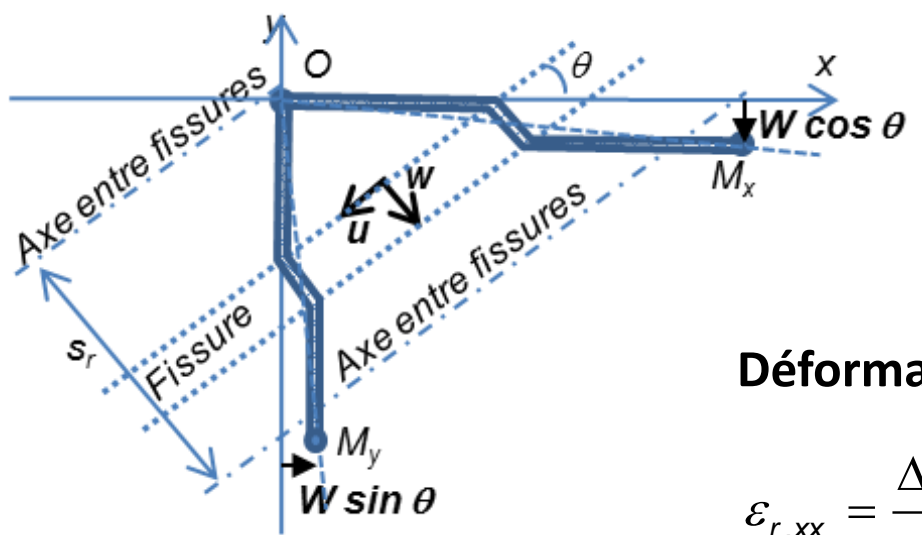
$h/2$  Pour les murs minces





$$\sigma_{sx} = \frac{N_r - 2\beta f_{ct} h_{eff}}{2h_{eff} \rho_{sx,eff}} \Rightarrow \begin{cases} \varepsilon_{s,x} \\ \varepsilon_{s,y} \end{cases}$$

$$\sigma_{sy} = \frac{N_r - 2\beta f_{ct} h_{eff}}{2h_{eff} \rho_{sy,eff}}$$



⇒  $\varepsilon_{xx}$  est différent de  $\varepsilon_{s,x}$

Déformation moyenne due à la fissure :

$$\varepsilon_{r,xx} = \frac{\Delta s_x}{s_x} = -\frac{U}{s_x} \cos \theta + \frac{W}{s_x} \sin \theta$$

**Distorsion moyenne due à la fissure :**

$$\alpha = 2\varepsilon_{r,xy} = -2 \frac{w}{s_r} \sin \theta \cos \theta + \frac{u}{s_r} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta)$$

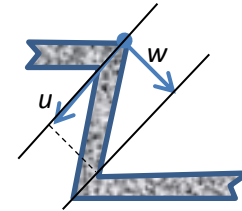
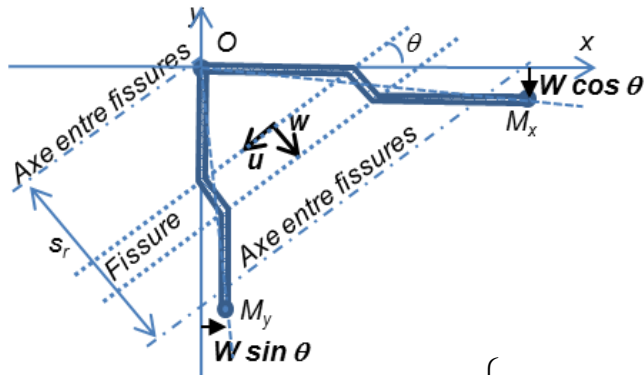
**Déformation moyenne totale due à la fissure perpendiculairement à la fissure :**

$$\varepsilon_{r\perp} = \varepsilon_{r,xx} \sin^2 \theta + \varepsilon_{r,yy} \cos^2 \theta - 2\varepsilon_{r,xy} \sin \theta \cos \theta = \frac{w}{s_r}$$

**⇒ D'OÙ LA FORMULE DU MC10**

$$w_d = 2 \cdot l_{s,\max,\theta} (\varepsilon_{\perp} - \varepsilon_c)$$

## ► Relation entre ouverture de fissure et déformation des armatures



$$\varepsilon_{s,x} = \frac{\sqrt{u^2 + w^2}}{s_r} \sin \theta \approx \frac{w}{s_r} \sin \theta \quad \text{si } u \ll w$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \varepsilon_{c//} \cos^2 \theta + \varepsilon_{c\perp} \sin^2 \theta + \frac{\sqrt{u^2 + w^2}}{s_r} \sin \theta = \varepsilon_{s,x} \\ \varepsilon_{c//} \sin^2 \theta + \varepsilon_{c\perp} \cos^2 \theta + \frac{\sqrt{u^2 + w^2}}{s_r} \cos \theta = \varepsilon_{s,y} \end{cases}$$

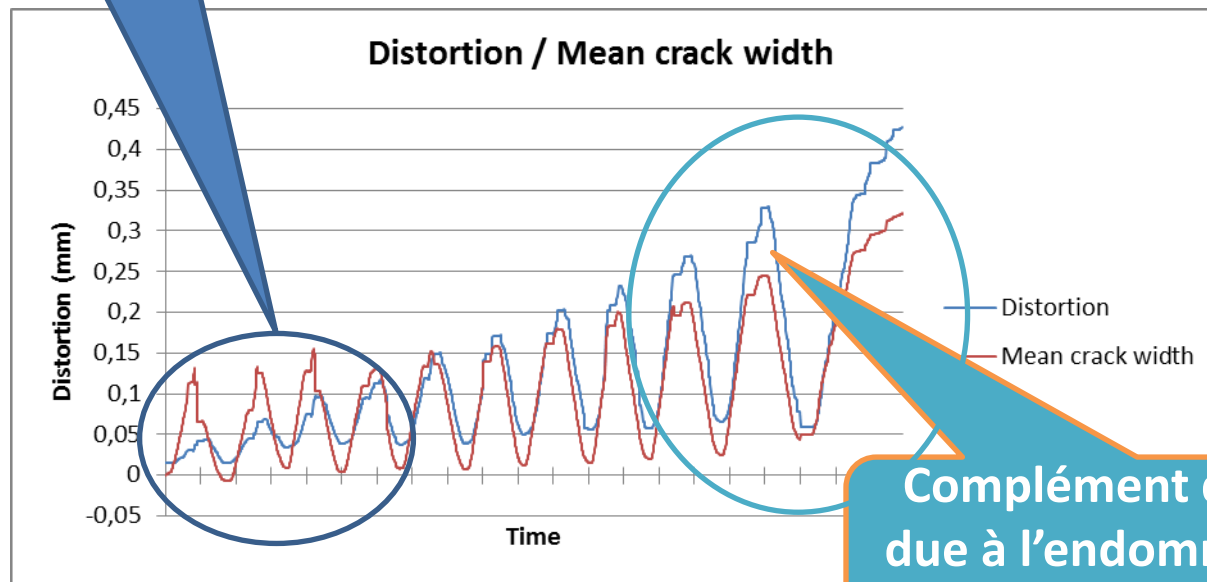
Si  $u \ll w$ :  $\frac{w}{s_r} \approx \varepsilon_{s,x} \sin \theta + \varepsilon_{s,y} \cos \theta$

**Compatibilité assurée à l'optimum**

## ► Distorsion du voile

$$\alpha = 2\varepsilon_{xy} = \left[ \frac{w}{I_{s,max,\theta}} - \frac{1}{hE_c} (N_{//} - 2\beta f_{ct} h_{eff}) \right] \sin \theta \cos \theta$$

Fissuration non stabilisée



Mur CEOS n°3

Complément de distorsion due à l'endommagement du béton

- ▶ S'assurer que les fissures sont influencées par le cisaillement
- ▶ L'état de contraintes peut être obtenu par un modèle de structure en béton armé ou un modèle élastique
- ▶ L'angle des fissures est lié aux directions principales de contraintes
- ▶ La formule de Vecchio et Collins est acceptable si les fissures ont suffisamment inclinées et si la répartition des armatures est proche de l'optimum
- ▶ Pour le calcul des espacements de fissures dans la direction des armatures, il est acceptable de prendre en compte l'enrobage moyen entre les deux nappes

- ▶ Les contraintes dans les armatures peuvent être déduites de la transmission à travers la fissure des efforts membranaires issus du calcul de structure
- ▶ La déformation moyenne des armatures doit aussi prendre en compte la participation du béton
- ▶ La cinématique de déformation des armatures permet de calculer l'ouverture de fissure
- ▶ La distorsion globale d'un voile est déductible de l'ouverture des fissures

- ▶ Dans une situation ELU, la participation du béton à la traction est plus faible qu'à l'ELS et il y a lieu de la diminuer.
- ▶ Du fait de la sollicitation cyclique alternée entraînant un endommagement un peu supérieur dû au double réseau de fissures, la résistance maximale et la raideur fissurée sont diminuées d'environ 10%.
- ▶ L'ouverture maximale des fissures en cours de séisme augmente plus vite que la simple proportionnalité à la sollicitation.
- ▶ L'ouverture résiduelle acquise en fin de mouvement sismique se forme tôt après ouverture de la fissure ; elle ne dépend pas de façon significative de l'ouverture maximale atteinte et les valeurs observées dépassent rarement 0,1 mm.

**MERCI POUR VOTRE  
ATTENTION**

