

CHAPITRE. 3 FACTEURS INFLUENTS SUR LA TENUE EN FATIGUE :

Il y a un grand nombre de paramètres susceptibles d'affecter la résistance à la fatigue et donc de modifier la courbe S-N. Ces facteurs peuvent être classés comme suit :

- Facteurs dépendants des conditions de sollicitation (nature des charges : traction/compression, flexion alternée, flexion rotative, torsion alternée, ...) ;
- Facteurs géométriques (effet d'échelle, forme, ...) ;
- Facteurs dépendant des conditions de surface ;
- Facteurs d'ordre métallurgiques ;
- Facteurs d'environnement (température, corrosion, ...) ;

La limite de fatigue d'une éprouvette peut ainsi être exprimée sous la forme:

$$\sigma D = K_e \cdot K_s \cdot K_\theta \cdot K_d \cdot K_g \cdot K_h \cdot \sigma' D$$

K_e : effet d'échelle

K_s : effet de surface

K_θ : effet de la température

K_d : effet de forme (entailles, congés, ...)

K_g : effet de fiabilité

K_h : effets divers (vitesse de charge, type de charge, corrosion, contraintes résiduelles, fréquence de la sollicitation, ...)

Paramètres d'ordre métallurgique

Taille des grains : Les structures à grains fins présentent une meilleure tenue en fatigue que les structures à gros grains.

Orientation du fibrage par rapport à la direction des efforts : L'orientation générale des grains (fibrage) confère au matériau une anisotropie plus ou moins marquée. Les caractéristiques statiques et la tenue en fatigue seront meilleures dans le sens long du fibrage que dans les autres sens (travers long et travers court).

Taux d'écrouissage : L'écrouissage résultant des opérations de formage a pour effet de consolider le matériau (augmentation de la limite d'élasticité), et par suite, améliore la tenue en fatigue.

Traitement thermique : Suivant que le traitement thermique provoque un adoucissement ou un durcissement du matériau, la tenue en fatigue sera diminuée ou augmentée. De plus, le traitement thermique peut modifier la taille des grains.

Santé métallurgique de l'alliage : Les défauts métallurgiques (lacunes, défauts interstitiels, précipités, inclusions) peuvent être à l'origine de l'endommagement par fatigue. Par incompatibilité des déformations, ils provoquent des concentrations de contraintes locales. L'abatement de durée de vie dépendra de leurs quantités, taille, nature, répartition, orientation par rapport aux efforts.

Paramètres d'ordre mécanique et géométrique :

Nature du chargement : Le chargement peut être monotone ou variable (et même aléatoire, spectre). Dans le cas des chargements monotones les paramètres prépondérants sont :

- **la forme du signal :** un signal de type carré est plus pénalisant que celui de type sinusoïdal;
- **le rapport R** (rapport entre la valeur minimale et la valeur maximale du chargement) : à contrainte maximale constante, si R augmente, la durée de vie augmente;
- **la contrainte moyenne :** à amplitude de chargement constante, si S_m augmente, la durée de vie diminue.

La période du signal a en général peu d'influence sur la durée de vie. Cette règle est infirmée quand le phénomène de fatigue est associé à d'autres modes

d'endommagement fonction du temps : fatigue/corrosion, fatigue/fluage, ou lorsque la rapidité des sollicitations produit un échauffement.

Dans le cas des chargements variables, les paramètres prépondérants sont :

- la présence de surcharges : la répétition périodique d'une surcharge peut retarder la propagation de fissures;
- l'ordre d'apparition des cycles.

Accidents de forme (discontinuité dans la géométrie : entailles, trous...) : Un accident de forme augmente localement le niveau de contrainte. Cette augmentation peut être traduite par un coefficient de contrainte élastique K_t : rapport entre la contrainte locale maximale et la contrainte nominale. Dans le domaine d'endurance limité (domaine visé par l'industrie aéronautique), si la valeur de K_t augmente, la durée de vie diminue.

Effet d'échelle : A niveau de contrainte égale, deux pièces de même géométrie mais de dimensions différentes n'auront pas la même tenue en fatigue : plus les dimensions d'une pièce croissent, plus sa résistance à la fatigue diminue. Cette observation s'explique principalement par le volume de matière sollicité : plus celui-ci est grand, plus la probabilité d'avoir des défauts métallurgiques est grande. Weibull en a donné une interprétation phénoménologique. Z. Bazant a ensuite apporté une explication quantitative grâce à la mécanique de la rupture.

Qualité de l'usinage : Généralement, l'endommagement par fatigue apparaît en premier lieu à la surface des pièces. La prise en compte des deux aspects suivants améliore la tenue en fatigue :

- **l'aspect micro géométrie de la surface :** un mauvais usinage provoque en surface des microreliefs susceptibles d'augmenter localement le niveau de contrainte ; l'amorçage des fissures en surface est donc retardé lorsque la rugosité est faible ;

- **l'aspect contraintes résiduelles** : l'usinage peut introduire des contraintes résiduelles de traction en surface (elles sont équilibrées en profondeur par des contraintes résiduelles de compression) ; ces contraintes se superposant à celles du chargement accélèrent l'endommagement par fatigue.

Environnement : Un milieu agressif (températures élevées, milieux corrosifs...) aggrave le phénomène de fatigue. Il apparaît des phénomènes nouveaux comme le fluage ou la corrosion. Leur action est liée au temps d'exposition.

4-Diagrammes de représentation de la fatigue :

1- Diagramme de Goodman :

Sur ce diagramme on représente l'amplitude de contrainte σ_a en fonction de la contrainte moyenne σ_m . Deux points particuliers apparaissent :

- **le point A** : représente la limite d'endurance σ_D en sollicitation purement alternée ($\sigma_D = \sigma_a$) ;
- **le point B** : représente le comportement limite du matériau pour une contrainte alternée nulle. Ce point correspond **Rm** au cours d'un essai statique.

L'ensemble des limites d'endurance observées pour diverses valeurs de la contrainte moyenne, se placent alors sur une **courbe AB** ajustée en fonction des résultats d'essais. Le domaine limité par cette **courbe AB** et les deux axes de coordonnées, représentent le **domaine de fonctionnement autorisé** avec le matériau pour avoir une durée de vie supérieure ou égale aux nombres de cycles pour lequel a été déterminée la limite d'endurance.

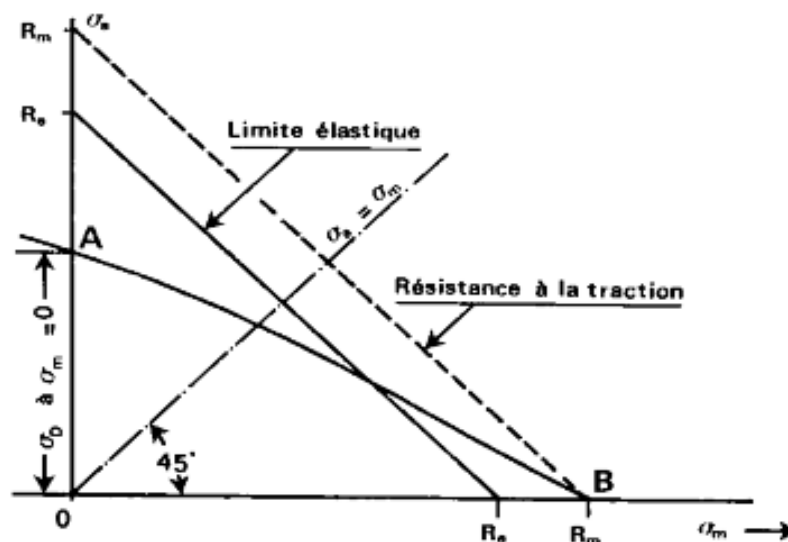


Figure : Diagramme de Goodman

Sur ce diagramme on utilise parfois des « rayons » qui représentent le rapport entre σ_a et σ_m . Ces rayons sont alors paramétrés en fonction des valeurs que prend ce rapport. Le diagramme de Haigh peut être ensuite limité par la droite représentant la limite d'élasticité du matériau.

Plusieurs représentations de la courbe AB ont été proposées et qui permettent déconstruire un diagramme d'endurance approché, lorsqu'on ne connaît que la limite d'endurance en sollicitation purement alternée et les caractéristiques mécaniques statistiques (R_e , R_m) du matériau.

$$\text{Droite de Goodman : } \sigma_a - \sigma_D \left(1 - \frac{\sigma_m}{R_m} \right);$$

$$\text{Droite de Söderberg : } \sigma_a - \sigma_D \left(1 - \frac{\sigma_m}{R_e} \right);$$

$$\text{Parabole de Gerber : } \sigma_a - \sigma_D \left(1 - \left(\frac{\sigma_m}{R_m} \right)^2 \right);$$

La figure ci-dessous montre que les droites de Goodman et Söderberg, pénalisent fortement la tenue en fatigue par rapport à la formule parabolique de Gerber. Cette dernière relation est intéressante dans le domaine $\sigma_a > 0$.

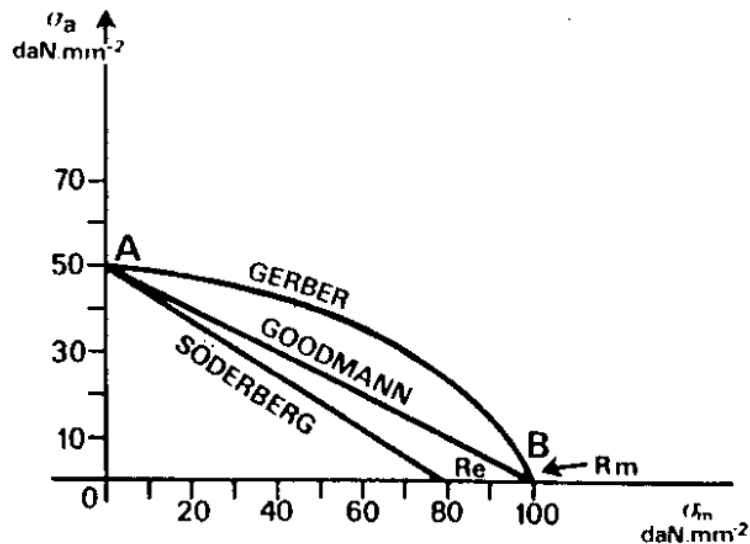


Figure : Diagramme de Goodman. Différentes représentations de la courbe AB

2-Diagramme de Goodman-Smith :

On représente sur ce diagramme la variation des contraintes maximales σ_{max} et minimales σ_{min} en fonction de la contrainte moyenne σ_m . On retrouve Les points particuliers A et B, ainsi que les différentes formes de courbes droite

de Goodman, parabole de Gerber ou toute autre courbe représentative d'une fonction ajustée aux résultats d'essais.

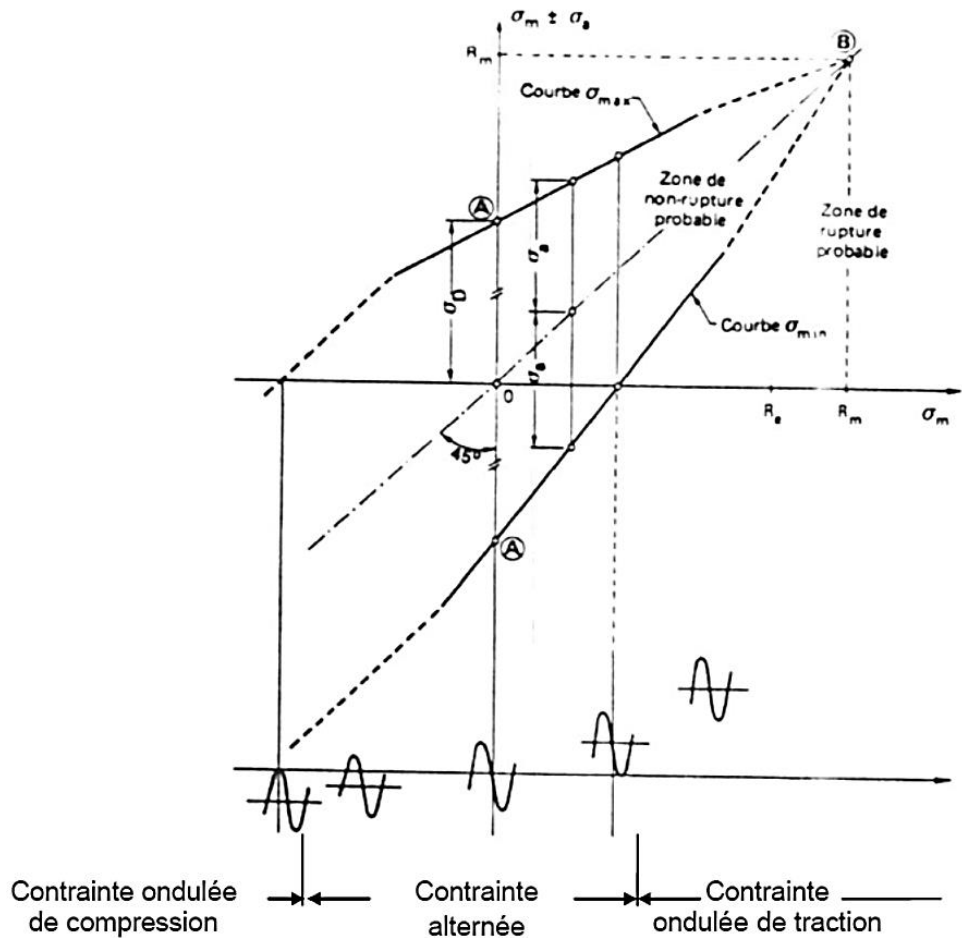


Figure : Diagramme de Goodman-smith

3- Diagramme de Rôl :

Ce diagramme est utilisé dans les pays anglo-saxon, il représente la variation de la contrainte maximale σ_{max} en fonction de la contrainte minimale σ_{min} . En plus des deux points particuliers A et B, apparaît un autre point particulier C correspond à $\sigma_{min} = 0$. Un certain nombre de valeurs particulières du rapport des contraintes ($R\sigma = R_{max}/R_{min}$) et ($R\sigma = -1/2$ et $R\sigma = 1/2$) sont portées au diagramme.

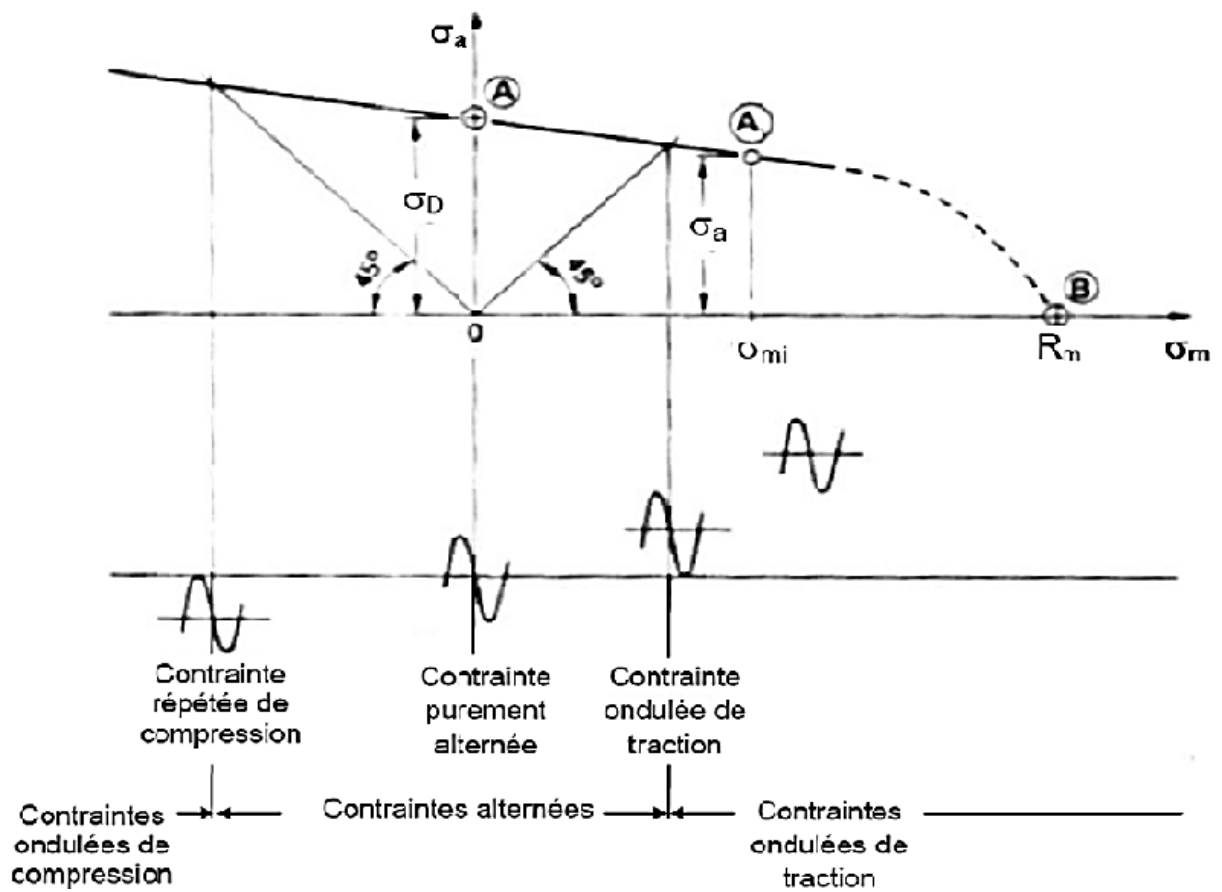
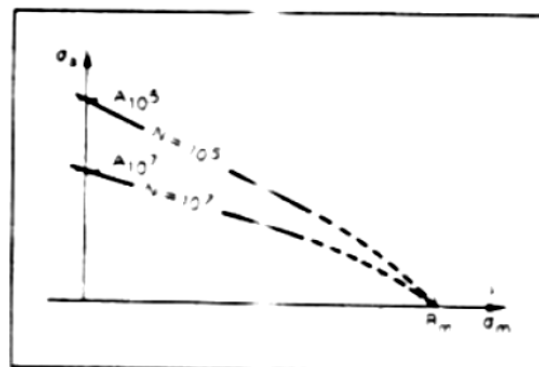
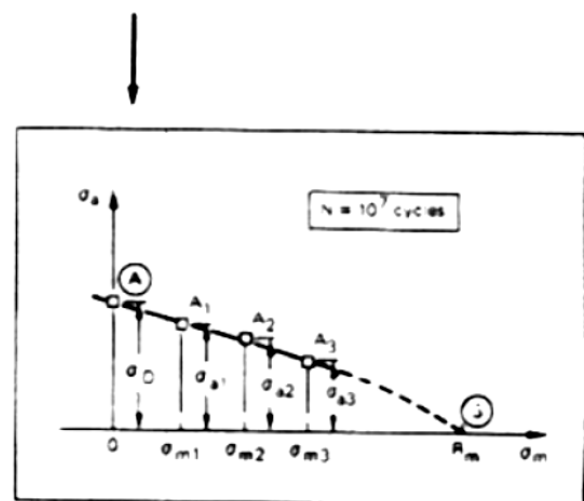
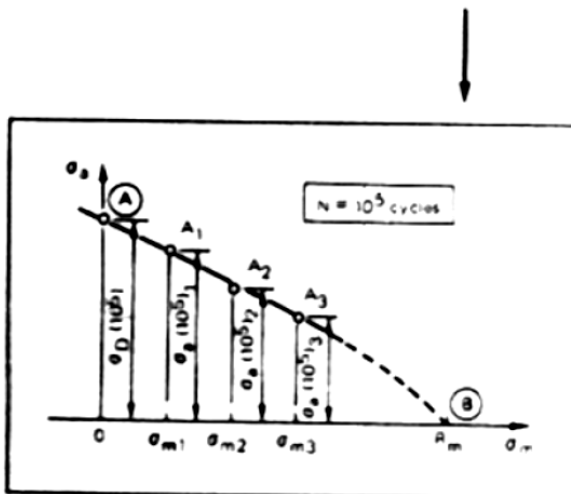
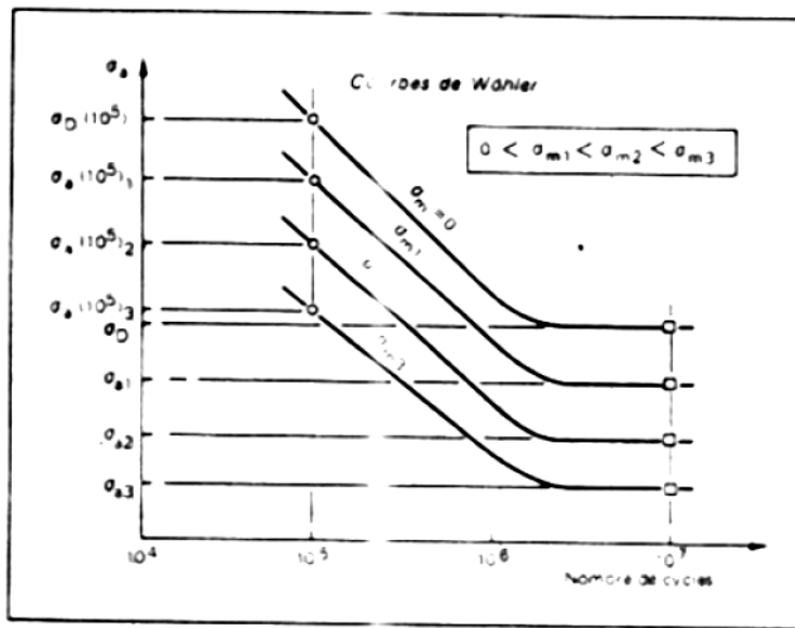


Figure : Diagramme de Haigh (résultats théoriques).



5- Diagramme de Moore- Kommers- Jaspers :

Essentiellement utilisé dans les pays germaniques, il est peu connu, ce diagramme présente la variation de la contrainte maximale $\sigma_{\max}$ en fonction du rapport des contraintes $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$. Ce diagramme présente un grand intérêt pour la détermination de $\sigma_{\max}$ lorsqu'on ne connaît pas la contrainte moyenne σ_m .

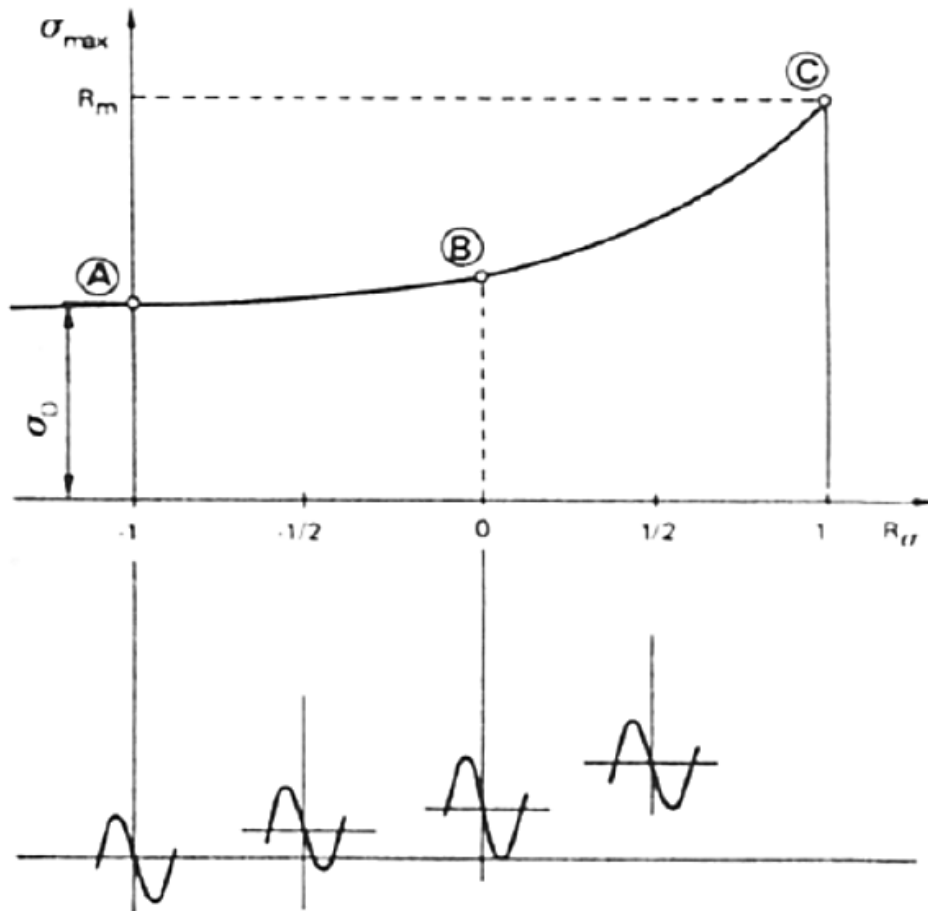


Figure : Diagramme de Moore- Kommers- Jaspers.