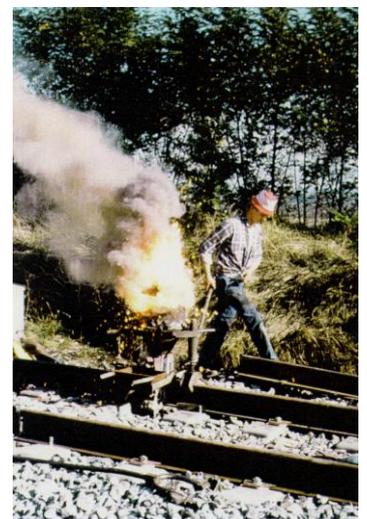


Théorie Simplifiée des LRS



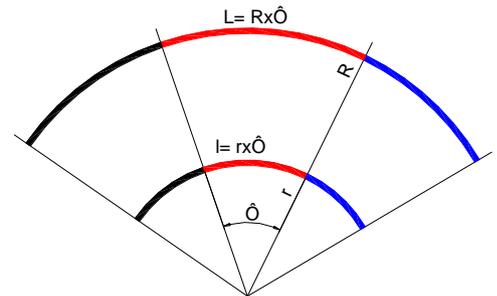
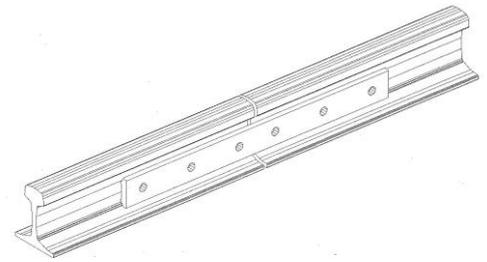
SOMMAIRE

1	Assemblage des rails.....	3
2	Difficultés techniques de réalisation.....	3
3	Théorie simplifiée.....	4
4	Répartition des contraintes	5
5	Valeur du déplacement en bout de barre.....	5
6	Études de la variation de température.....	7
6.1	La température diminue de t_1 à t_2	7
6.1.1	Dans la zone neutre	7
6.1.2	Dans la zone de respiration	7
6.2	La température augmente de t_2 à t_3	12
7	Contraintes d'utilisation des LRS.....	14
7.1	Contraintes de tracé et d'armement	14
7.2	Contraintes d'entretien et en cours de travaux.....	14

1 ASSEMBLAGE DES RAILS

Réalisé au moyen d'éclisses, l'assemblage des rails est source de plusieurs problèmes :

- ⇒ Création de dépression au droit de chaque joint entraînant l'inconfort des voyageurs et la fatigue du matériel roulant.
- ⇒ Déformation et éventuellement rupture des abouts des barres (rechargement d'about)
- ⇒ Déconsolidation des attaches et de l'appui des traverses de joint sur leur moule par suite des chocs et vibrations conjuguées des essieux et du rail entraînant des gauches.
- ⇒ Formation de « mini LRS » par grippage des éclisses pouvant provoquer des déformations de la voie (flambage, déripage) nécessitant un entretien important (démontage et graissage des éclisses, reprise de la qualité géométrique de la voie,...)
- ⇒ Bruits dû aux chocs
- ⇒ Équerrage des joints en pose à joint concordant imposant des calculs de longueur de rail différente entre grand et petit rayon en courbe.
- ⇒ Pose alternée des joints provoquant des gauches entraînant le roulis du matériel et des reprises fréquentes d'entretien.
- ⇒ Faiblesse du rail au joint due au faible moment d'inertie à cet endroit. Le moment d'un rail de 50 kG/m est de 2018 cm⁴ celui d'une éclisse de 212,3 cm⁴ soit 424,6 cm⁴ pour les 2 éclisses (pas loin de 5 fois moins)



La résolution de ces différents problèmes a conduit à l'élimination des joints de rail par soudure des barres, donc par la création des longs rails soudés (LRS).

LRS : Barre de longueur suffisante pour qu'un au moins un de ses points reste fixe quelle que soit les variations de température.

Le gain en entretien par l'allongement des défauts de nivellement et leur aggravation plus lente est estimé à 30%.

2 DIFFICULTÉS TECHNIQUES DE RÉALISATION

Il a fallu résoudre 3 problèmes :

- ⇒ La soudure de l'acier à rail.
- ⇒ Les attaches de la voie devant assurer une liaison permanente.
- ⇒ La crainte du flambage conduisant à des études théoriques et expérimentales.

Des études théoriques ont été conduites par M. LEVI en 1932 et par M. MARTINET en 1936

Les problèmes d'attaches (attaches élastiques en 1947) et de soudure résolus, des études expérimentales ont eu lieu aux carrières Saint Maximin sous la direction de Ms. SONNEVILLE et SERGE en 1948. En 1949, le premier long rail soudé de 292 mètres a été posé à Estrée St Denis. En 1953, le Ministère autorise la généralisation des LRS mais de longueur inférieure ou égale à 800 mètres (les joints isolant collés (JIC) n'existant pas encore, cette longueur représente la longueur moyenne d'un canton électrique de signalisation) En 1963, apparition des JIC et en 1970 début de l'incorporation des appareils de voie dans les LRS.

Le 1^{er} plan ORSEC a été déclenché à Dijon le 23 juillet 1962 lors de l'accident survenu au viaduc de Velars suite à une déformation de la voie due à la chaleur sur celui-ci (chute de plusieurs voitures dans le vide 39 victimes)

3 THÉORIE SIMPLIFIÉE

Les corps se dilatent sous l'action de la chaleur, à l'équilibre thermique la loi générale de dilatation peut s'écrire :

$$\Delta L = L \alpha \Delta t$$

ΔL : variation de longueur
 L : longueur de la barre
 α : coefficient de dilatation linéaire $10,5 \cdot 10^{-6} \text{ m/m}^\circ\text{C}^1$ pour l'acier à rail (de l'ordre de $10 \cdot 10^{-7}$ pour l'invar, alliage de cuivre et de nickel)
 Δt : Variation de la température du rail
 t° Température mesurée dans le rail et non température ambiante

Exemple : pour une barre de 400 m, $\Delta t = 20^\circ$ $\Delta L = 84 \text{ mm}$
 $\Delta t = 40^\circ$ $\Delta L = 168 \text{ mm}$

Cette dilatation n'est pas admissible, on va donc la contrarier en transmettant l'effort dû à la dilatation au ballast par l'intermédiaire des traverses (attaches élastiques) Le poids de la voie, le frottement et la butée longitudinale des traverses sur le ballast s'oppose à la variation de longueur du rail.

Soit r cette résistance, elle est comprise entre 0,5 et 1 t/m de voie stabilisée (passage de 100 000 t minimum) on retiendra la moyenne de 0,75 t/m (750 daN/m) elle chute à 250 daN/m pour une voie non stabilisée (en cours de travaux)

S'opposer à l'allongement de la barre revient à exercer sur elle une force de sens opposé donnant une déformation égale à celle produite par l'allongement. Cette déformation est donnée par la loi de Hooke ($\Delta L = F/ES$ résistance des matériaux)

$$\Delta L = \frac{F_r L}{ES}$$

ΔL : variation de longueur (m)
 L : longueur de la barre en (m)
 E : module d'Young 21 000 daN/mm²
 S : section de la barre (mm²)

L'effort dans la barre dû à la dilatation sera donc :

$$\frac{F_r L}{ES} = L \alpha \Delta t \Rightarrow F_r = ES \alpha \Delta t$$

Exemples : $\Delta t = 40^\circ$

Rail de 46 kg	$S = 5906 \text{ mm}^2$	$F = 21 \times 5906 \times 10,5 \cdot 10^{-6} \times 40 = 52 \text{ t}$	104 t pour la voie
Rail de 50 kg	$S = 6450 \text{ mm}^2$	$F = 21 \times 6450 \times 10,5 \cdot 10^{-6} \times 40 = 57 \text{ t}$	114 t pour la voie
Rail de 60 kg	$S = 7686 \text{ mm}^2$	$F = 21 \times 7686 \times 10,5 \cdot 10^{-6} \times 40 = 68 \text{ t}$	138 t pour la voie

Soit un taux de contrainte F/S de 8,85 daN/mm² largement inférieur à 60 daN/mm² σ contrainte de l'utilisation de l'acier à rail.

On notera avec intérêt que la force est indépendante de la longueur de la barre, elle ne dépend que de la section et de la variation de température.

¹ 11,5 $\cdot 10^{-6}$ depuis la canicule de l'été 2003 et des nombreux désordres constatés.

Connaissant la résistance de frottement dû au ballast, on peut calculer la longueur de voie nécessaire pour bloquer l'allongement du rail. En considérant que la résistance du ballast est linéaire et constante (simplification) la force de résistance $F_r = L r$, donc :

$$Lr = ES\alpha\Delta t \Rightarrow L = \frac{ES\alpha\Delta t}{r}$$

Sur cette longueur L , r s'oppose partiellement aux variations de longueur dues à la dilatation. Au-delà, il n'y a plus allongement. L est appelé zone de respiration.

Il est intéressant de déterminer la longueur maximale de cette zone en fonction de l'armement utilisé pour établir les règles de pose et d'entretien. On a vu que r variait entre 500 daN/m et 1000 daN/m pour une voie stabilisée, soit la valeur moyenne de 750 daN/m, de plus, on impose de fixer les barres à une température T° telle que la variation de température (positive ou négative) ne donne pas une différence par rapport à T° supérieure à 45°.

$$L = \frac{2ES\alpha\Delta t}{r} = \frac{2 \times 21000 \times 7686 \times 10,5 \cdot 10^{-6} \times 45}{750} = 203,37m \text{ pour du rail de } 60 \text{ kg}$$

Compte tenu des différents profils de rails utilisés, on prend en moyenne 150 m d'où la longueur minimale de LRS de 300 m.

4 RÉPARTITION DES CONTRAINTES

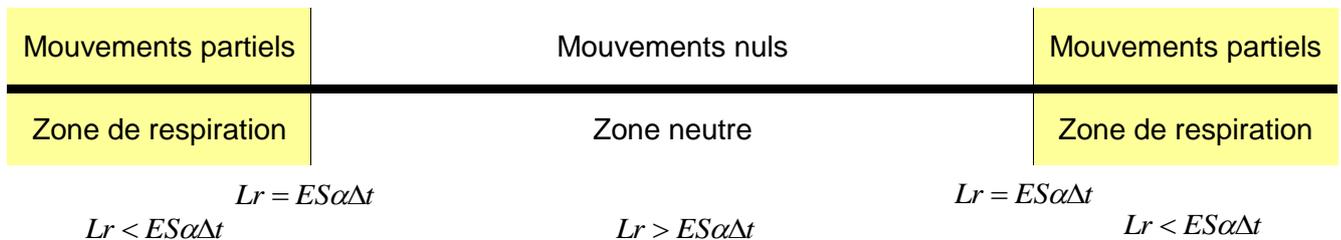
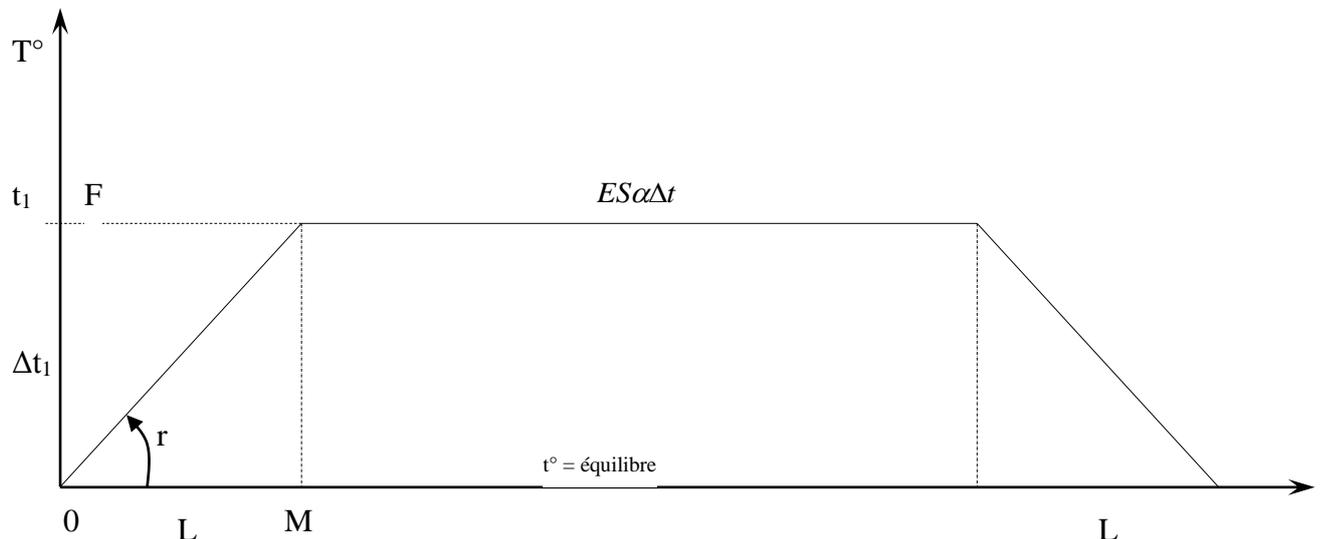


Figure 1



Équilibre statique

Le diagramme des contraintes est identique à l'homothétie 1/S près, $\sigma = E/S = E\alpha\Delta t$

5 VALEUR DU DÉPLACEMENT EN BOUT DE BARRE

Il est important de prévoir l'amplitude du déplacement résiduel en bout de barre pour concevoir les dispositifs à mettre en œuvre pour assurer la continuité du rail, les appareils de dilatation (AD)

Le déplacement en bout de barre est égal au déplacement total non contrarié ($L\alpha\Delta t$) moins le déplacement contrarié par la résistance du ballast (loi de Hooke F/ES)

La force F_r de résistance au ballast nulle en bout de barre est égale à rL en M (fig 1)

La force de résistance unitaire s'écrit

$$\frac{dF_r}{dx} = r = \text{constant} \text{ d'où } F_r = rx + k \text{ avec } k = 0 \text{ car } F_r = 0 \text{ en bout de barre}$$

sur la longueur L ,
$$F_r = \int_0^L rxdx = \frac{rL^2}{2}$$

La traduction du paragraphe précédent en équation donne :

$$\Delta L = L\alpha\Delta t - \frac{rL^2}{2ES} \text{ or } L = \frac{ES\alpha\Delta t}{r}$$

en remplaçant L par sa valeur,

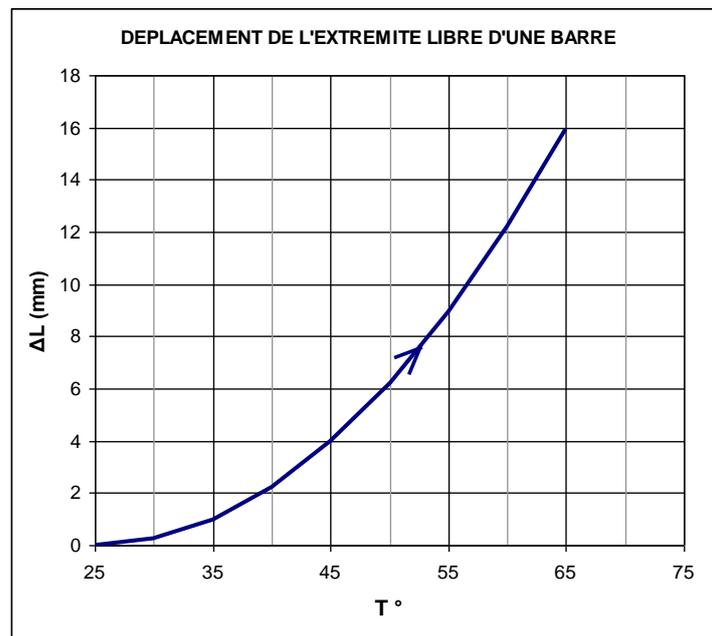
$$\Delta L = \frac{ES\alpha\Delta t}{r} \alpha\Delta t - \frac{r}{2ES} \left(\frac{ES\alpha\Delta t}{r} \right)^2$$

$$\Delta L = \frac{ES\alpha^2\Delta t^2}{r} - \frac{ES\alpha^2\Delta t^2}{2r} = \frac{ES\alpha^2\Delta t^2}{2r}$$

C'est une parabole de la forme :

$$y = Px^2 \text{ avec } P = \frac{ES\alpha^2}{2r} \text{ P étant constant pour un ballast donné}$$

Exemple pour un rail de 50kg

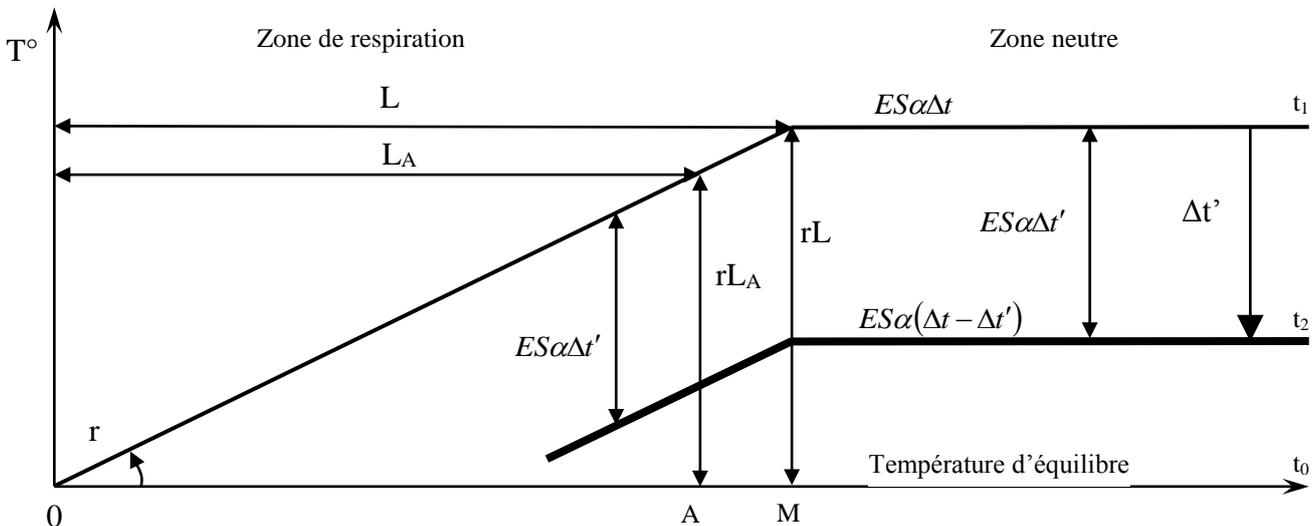


6 ÉTUDES DE LA VARIATION DE TEMPÉRATURE

6.1 La température diminue de t_1 à t_2

6.1.1 Dans la zone neutre

Figure 2



Après la montée en température de t_0 à t_1 , la barre se trouve en état d'équilibre statique entre les forces existantes dans la barre ($ES\alpha\Delta t$) et la résistance du ballast. La diminution de température provoque l'apparition d'un nouveau diagramme des efforts (figure 2) et $\Delta t'$ étant inférieur à Δt , il va subsister des forces. Cette simple diminution des contraintes, qui reste positive, ne provoque pas de mouvement et le nouveau diagramme des efforts est parallèle au précédent (Δt) avec $F = ES\alpha(\Delta t - \Delta t')$

6.1.2 Dans la zone de respiration

Au point A :

La valeur des efforts existant dans la barre après Δt étant supérieure à celle négative sous $\Delta t'$, il subsiste en A des contraintes positives. Après diminution de valeur $ES\alpha\Delta t'$, le diagramme reste parallèle à celui sous Δt (figure 2). Il n'y a pas de mouvement de la barre en ce point.

Le point A a subi un déplacement lors de la montée en température de t_0 à t_1 . La baisse de température de t_1 à t_2 se produit à partir de la nouvelle position du point A, en l'équilibre statique dans cette position, entre les forces existantes dans la barre et la résistance du ballast.

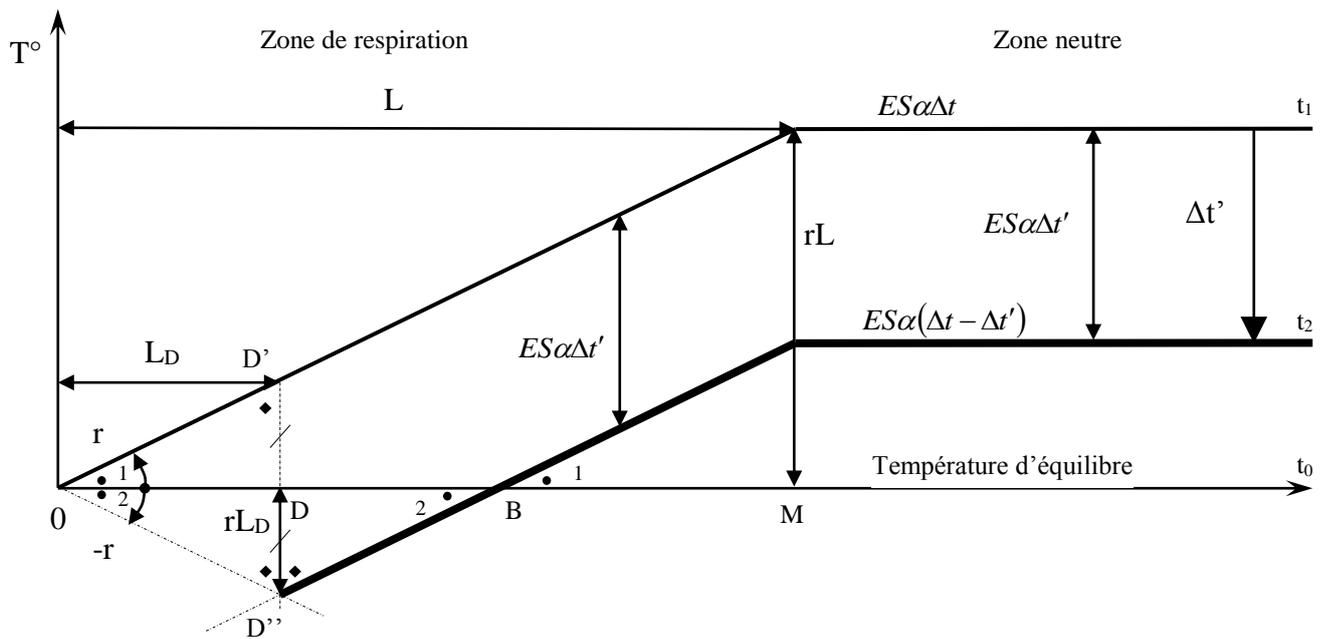
L'élévation de température Δt a produit des efforts de valeur $ES\alpha\Delta t$ dans la barre (au point M il y a eu équilibre entre $ES\alpha\Delta t$ et rL). Au point A, une partie de ces forces s'est dissipée sous forme de mouvement, les forces restantes étant égales à la résistance du ballast rL_A .

Ces forces sont, en ce point, supérieures en valeur absolue à celles produites par la baisse t_1 à t_2 , il y a en A seulement diminution de la valeur des contraintes, mais pas de mouvement.

Pour provoquer un déplacement en A lors d'une baisse de température, il faudrait d'abord annuler les efforts existants, puis provoquer des contraintes négatives de valeur supérieures à rL_A .

Au point D

Figure 5



D est le milieu de OB. En ce point, les forces négatives mises en jeu deviennent égales à la résistance du ballast rL_D .

Elles valent : $\frac{ES\alpha\Delta t'}{2}$

En effet, le triangle $D'OD''$ est isocèle de base $D'D'' = ES\alpha\Delta t'$.

Les angles 01 et B2 sont égaux (angles alternes internes à 2 droites parallèles) $01 = 02$ car la résistance du ballast est supposée égale dans les 2 sens donc $02 = B2$ et le triangle $OD''B$ est isocèle de base OB.

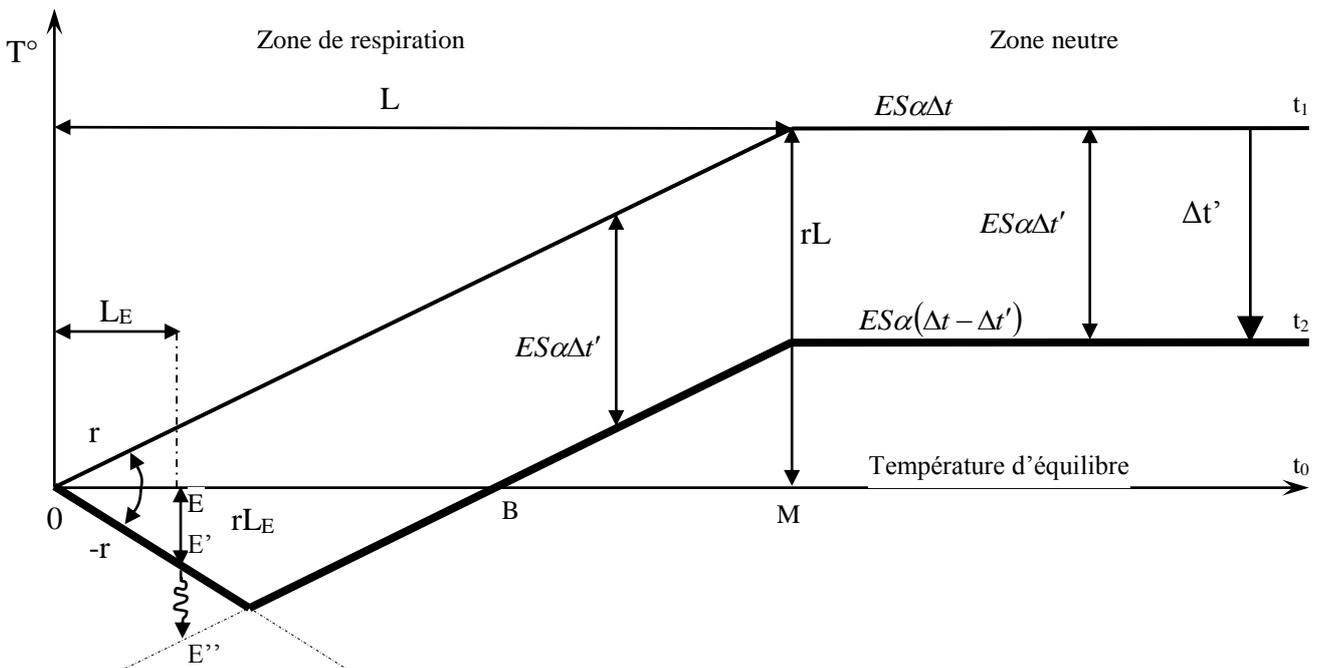
D est milieu de OB donc D est le pied de la hauteur du triangle $OD''B$ et l'angle $D = 90^\circ$.

Les triangles ODD' et ODD'' sont semblables car ayant 3 angles égaux ($01, 90^\circ - 01, 90^\circ$ et $02, 90^\circ - 02, 90^\circ$) ils sont égaux ayant un coté commun OD est les angles D' et D'' sont égaux. $D''OD'$ est donc isocèle de hauteur OD donc $D'D = DD'' = D'D'' / 2$ (CQFD)

Le diagramme des efforts sous $\Delta t'$ rencontre la droite de pente $-r$ (résistance du ballast)
Il n'y a pas déplacement du point D.

Au point E

Figure 6



En E, la diminution, d'une valeur $ES\alpha\Delta t'$, des forces provoque d'abord la disparition des contraintes positives existantes, le passage par un état de contraintes nulles, puis l'apparition de contraintes négatives. Les forces négatives qui prennent ainsi naissance dans la barre deviennent égales, puis supérieures, à la résistance du ballast égale à rL_E (EE') en ce point

Le point E se déplace avec dissipation des forces $E'E''$ sous forme de mouvement.

Donc à partir du point D, sur l'ensemble de la zone D0, il y a déplacement de chacun des points de la barre de D vers 0. Le diagramme des forces existantes s'inscrit suivant la droite de pente $-r$.

Calcul du déplacement de l'extrémité de la barre

Nous avons vu que les forces qui provoquent le déplacement apparaissent en D (figure 5 page 9) pour devenir maximales en 0 et égales à la valeur $rL_D = ES\alpha\Delta t'$

La loi de Hooke $\Delta L = \frac{F_r L}{ES}$ permet de calculer le déplacement du point 0

$$L = L_D \quad \text{et la force } F_r = rL_D \quad \text{en remplaçant dans la formule, on obtient } \Delta L = \frac{rL_D L_D}{ES} = \frac{rL_D^2}{4ES}$$

$$\text{hors } L_D = \frac{ES\alpha\Delta t'}{2r} \Rightarrow \Delta L = \frac{rE^2 S^2 \alpha^2 \Delta t'^2}{4r^2 ES} = \frac{ES\alpha^2 \Delta t'^2}{4r}$$

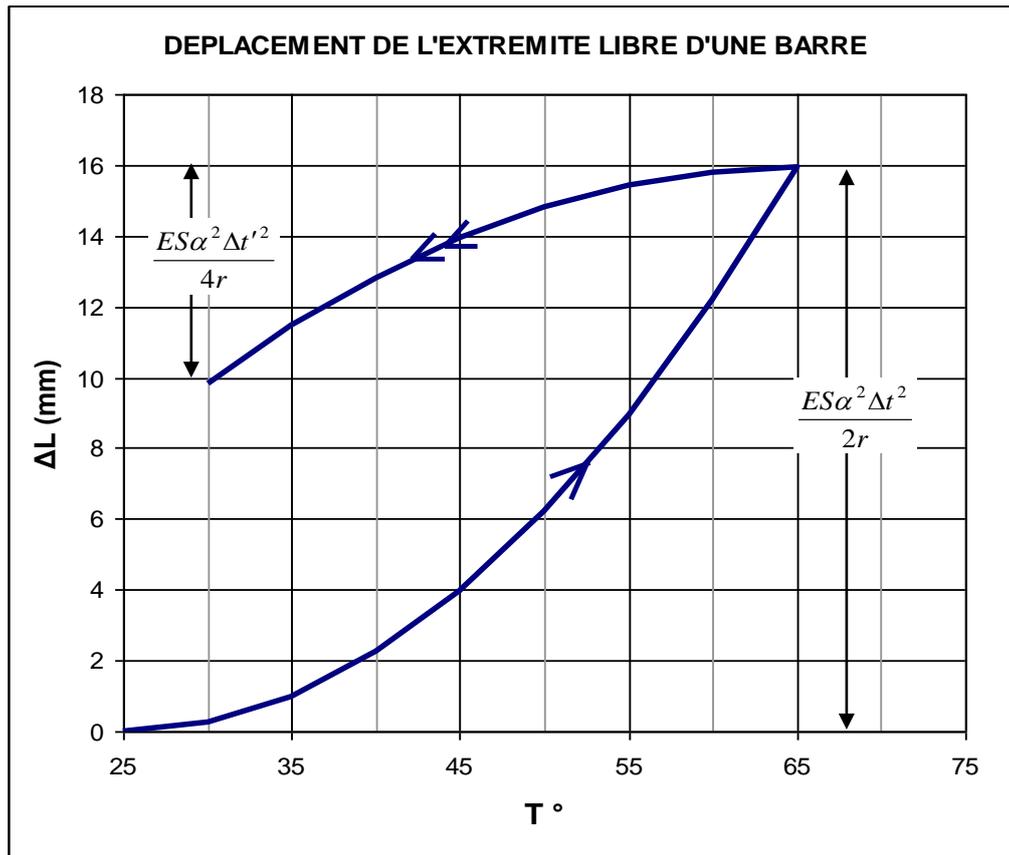
Ce deuxième déplacement du point 0 est donc de la forme $y = Px^2$, parabole d'axe vertical repérée par 2 flèches sur la figure 7 page 11.

Le déplacement résultant depuis la pose est :

$$\Delta L = \frac{ES\alpha^2 \Delta t^2}{2r} - \frac{ES\alpha^2 \Delta t'^2}{4r} = \frac{ES\alpha^2}{2r} \left(\Delta t^2 - \frac{\Delta t'^2}{2} \right)$$

allongement *rétraction*

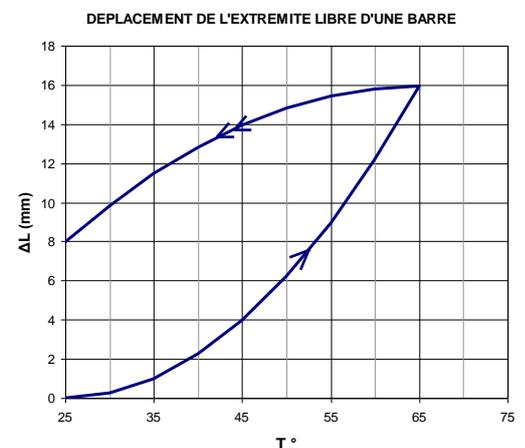
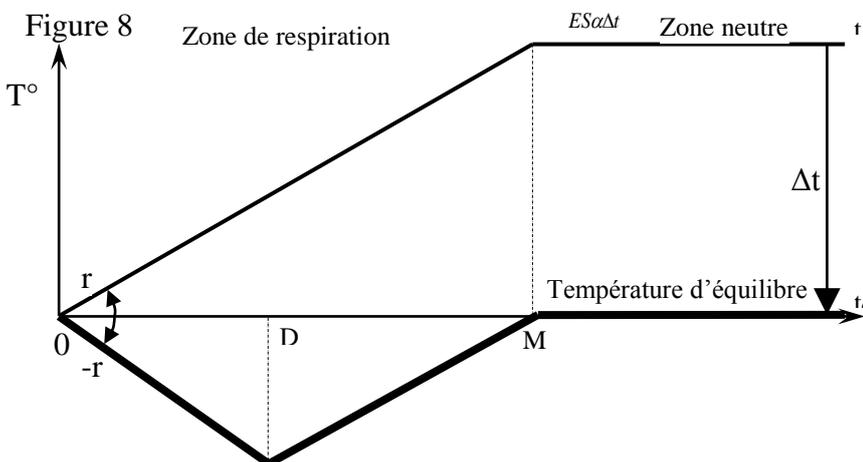
Figure 7



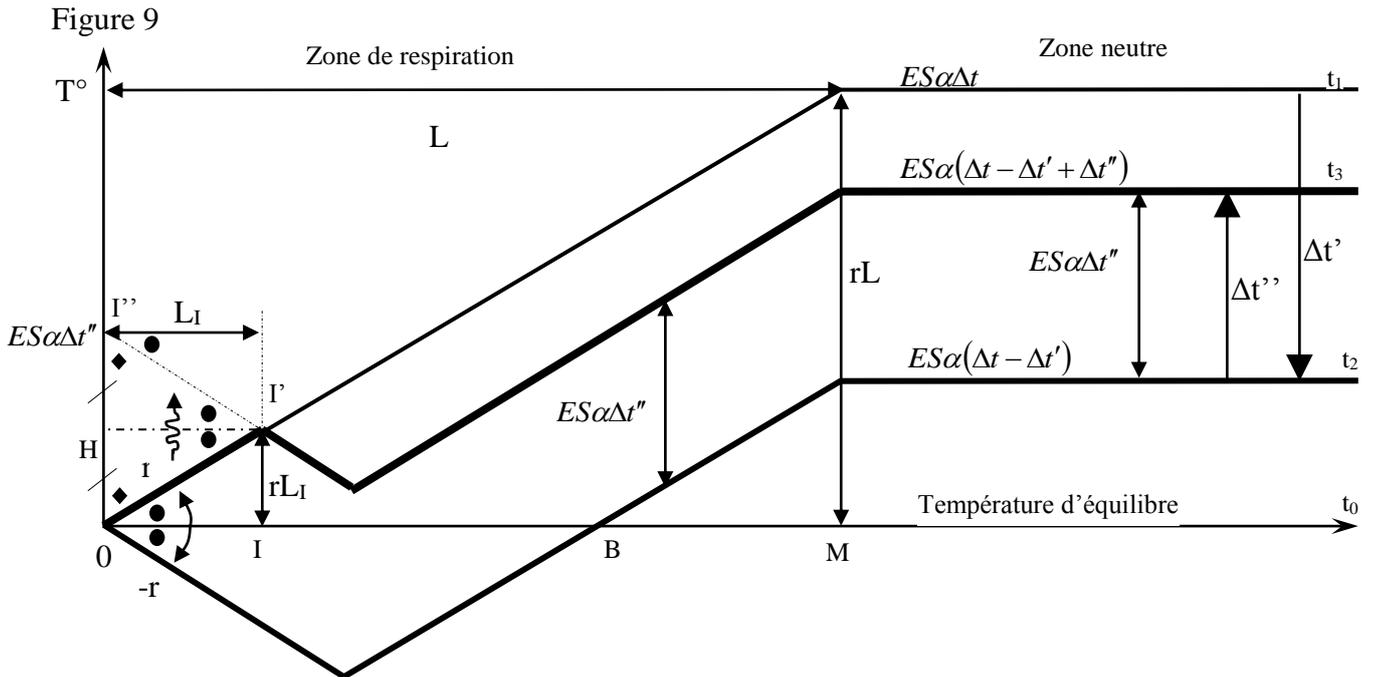
Concécquences :

Si après avoir subi une élévatiòn de température Δt , la barre subit une diminution Δt , c'est-à-dire si elle revient à sa température neutre, le diagramme des efforts est le suivant :

- Seule la zone centrale ou zone neutre retrouve l'état d'équilibre thermique
- Il subsiste des contraintes de valeur maximale $\frac{ES\alpha\Delta t}{2}$ dans la zone de respiration qui se trouve à l'état d'équilibre statique
- le mouvement résultant est : $\Delta L = \frac{ES\alpha^2 \Delta t^2}{4r}$
- l'ouverture de l'appareil de dilatation est différente de celle qu'il avait à la pose.



6.2 La température augmente de t2 à t3



Après la baisse de température de t_1 à t_2 , la barre se trouve à t_2 en état d'équilibre statique entre les forces existantes dans celle-ci et la résistance du ballast en chaque point. C'est à partir de ce nouvel état que va se modifier de la valeur $ES\alpha\Delta t''$, et $\Delta t''$ étant positif, les contraintes, les efforts vont augmenter en tous points de la barre de cette même valeur, pour autant qu'ils ne dépassent pas la valeur de la résistance du ballast en ces points, auquel cas une partie de ces forces provoquera le mouvement.

Ceci se produit à partir du point I sur la longueur 0I. Dans cette zone, lors de l'élévation de la température, il y a d'abord disparition des contraintes négatives existantes, passage par un état de contraintes nulles, apparition de contraintes positives ; lorsque les forces mises en jeu dépassent la résistance du ballast, il y a apparition du mouvement dans la barre. Le nouveau diagramme des efforts dans la barre se dessine donc en I, parallèlement à lui-même, et, de I vers 0, suivant la droite de résistance du ballast $+r$.

Calcul du déplacement de l'extrémité de la barre

Nous avons vu que les forces qui provoquent le déplacement apparaissent en I pour devenir maximales en 0 et égales à la valeur $ES\alpha\Delta t''$

Le triangle 0I'I'' est isocèle (démonstration similaire à celle utilisée pour le point D, droites parallèles et angles correspondants ou alternes internes), H est le pied de la hauteur et coupe donc 0I'' en 2 parties égales de valeur 0H)

$$0H = rL_1 = \frac{ES\alpha\Delta t''}{2}$$

La loi de Hooke permet de calculer le $\Delta L = \frac{F_r L}{ES}$ déplacement du point 0

$$L = L_1 \quad \text{et la force } F_r = rL_1 \quad \text{en remplaçant dans la formule, on obtient } \Delta L = \frac{rL_1 L_1}{ES} = \frac{rL_1^2}{ES}$$

$$\text{hors } L_1 = \frac{ES\alpha\Delta t''}{2r} \Rightarrow \Delta L = \frac{rE^2 S^2 \alpha^2 \Delta t''^2}{4r^2 ES} = \frac{ES\alpha^2 \Delta t''^2}{4r}$$

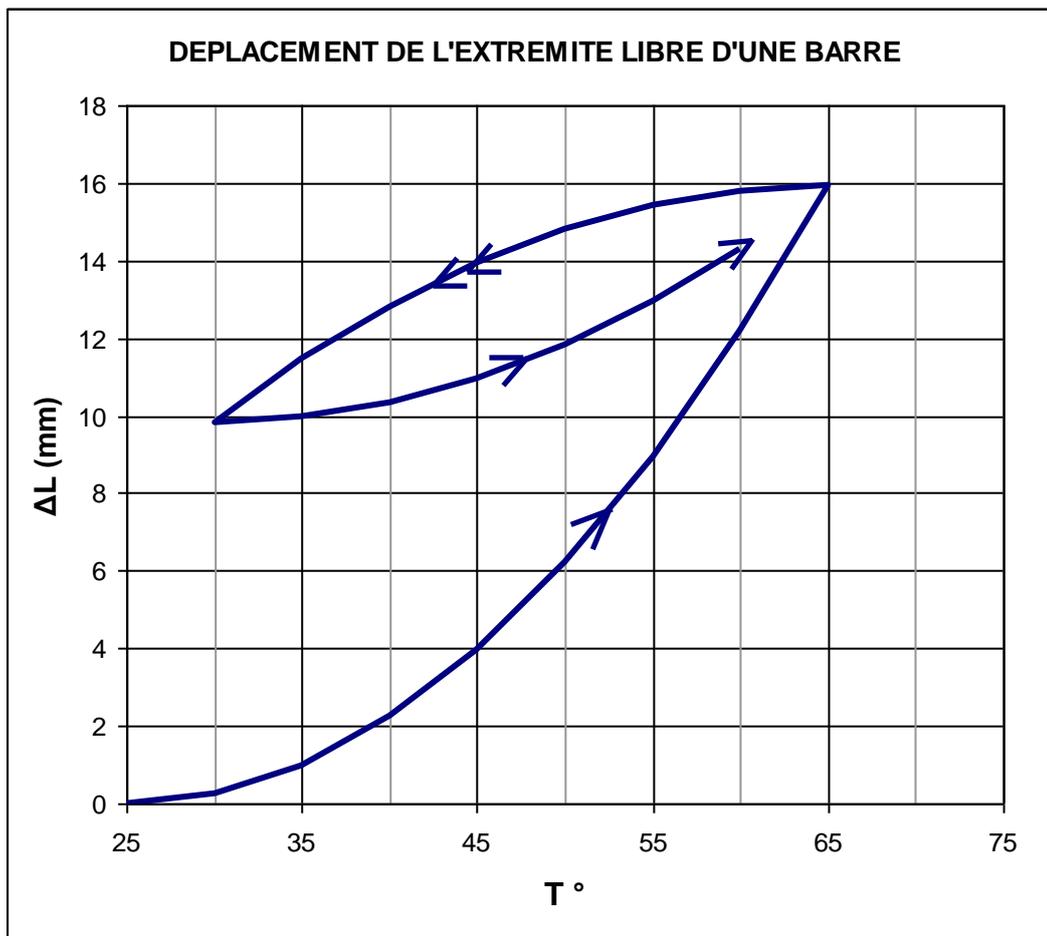
Ce troisième déplacement du point 0 est donc de la forme $y=Px^2$, parabole d'axe vertical repérée par 1 flèches sur la figure 10

Le déplacement résultant depuis la pose est :

$$\Delta L = \frac{ES\alpha^2 \Delta t^2}{2r} - \frac{ES\alpha^2 \Delta t'^2}{4r} + \frac{ES\alpha^2 \Delta t''^2}{4r} = \frac{ES\alpha^2}{2r} \left(\Delta t^2 - \frac{\Delta t'^2}{2} + \frac{\Delta t''^2}{2} \right)$$

allongement rétraction allongement

Figure 10



Établissement du diagramme des forces et des contraintes

Rappelons que le diagramme des contraintes est identique au diagramme des forces à l'homothétie 1/S près, la valeur de la contrainte égale $E\alpha\Delta t$

Géométriquement, le diagramme peut être établi simplement. Pour une nouvelle température, il est parallèle au diagramme de l'état précédent mais se raccorde à 0 par la droite de pente r ou $-r$ suivant qu'il s'agit d'une nouvelle élévation ou diminution de température. La distance entre chaque diagramme est égale à $E\alpha \times \Delta t$ nouveau.

Conséquences

Après une augmentation de température de t_0 à t_1 les irrégularités de la zone de respiration ne disparaîtront que si la barre subit une température $-t_1$ par rapport à sa température de pose t_0 . si cette température dépasse $-t_1$, la zone de respiration s'allongera.

Il n'est pas possible de connaître de manière théorique l'ouverture d'un appareil de dilatation (AD) Le jeu de celui-ci ne doit pas occasionner de blocage à l'ouverture (retrait) ou à la fermeture (dilatation).

Des calculs ont permis de déterminer des diagrammes vérifiés par l'expérimentation. Le réglage définitif s'effectue lors de la libération et fixation des barres dans la fourchette de température 20° à 32°.

Vérification de la course C :

⇒ en été $C > 70 - t^\circ$

⇒ en hiver $C < 180 - t^\circ$

⇒ La valeur à laquelle il faut ramener l'ouverture de l'AD en cas de dépassement $130 - t^\circ$

7 CONTRAINTES D'UTILISATION DES LRS

7.1 Contraintes de tracé et d'armement

La valeur minimum des rayons autorisés dépend :

De la classe d'entretien de la ligne (groupe UIC)

Du type de rail (section)

Du type de traverse

Du travelage (espacement des traverses) conditionnant l'importance du frottement

Du ballastage (nature, ancienneté du ballast, profil et épaisseur)

Les AD ne doivent pas être en rayon inférieur à 400 m. Ils peuvent être exceptionnellement posés en raccordement progressif si le gauche est inférieur à 1 mm/m

Il subsiste des problèmes avec les ouvrages d'art, les tunnels, les passages à niveau.

La température d'un LRS n'est pas forcément homogène (zone d'ombre, au soleil, en souterrain, etc.)

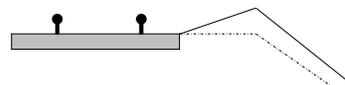
Exemple :

⇒ 1666 traverses bois par kilomètre, attaches élastiques RN ou Nabla, profil de ballast renforcé :

U33 R \geq 480 m

U50 R \geq 575 m

UIC 60 R \geq 840 m



⇒ Traverse béton travelage \geq 1200 T/km R \geq 400 m

Si traverses à blochet de 84 cm, R \geq 300 m

7.2 Contraintes d'entretien et en cours de travaux

On a vu que c'est la résistance du ballast qui contraint les déplacements du rail, cela implique que tout travaux entraînant une déstabilisation de la voie peut avoir de graves conséquences en LRS (dérivage de la voie notamment) Les travaux ne doivent pas être effectués entre le 15 mai et le 15 septembre sous réserve de fortes contraintes de réalisation notamment des ralentissements important. Si des coupes ont lieu, il est souhaitable de les réaliser proche de la température de pose à 25° (de nuit en été)

En cas de coupe pour remplacement de rail, de ripages sur de grandes longueurs ou supérieur à 40 mm il y a lieu de libérer ou d'homogénéiser les contraintes dans les barres

Avant, on chauffe les barres, après avoir desserré les attaches, à une température permettant d'avoir des contraintes régulières en allongeant la zone de respiration par exemple. Aujourd'hui, après avoir desserré les attaches et mis le rail sur rouleau, on tire sur celui-ci au moyen de vérins tendeurs pour avoir un déplacement équivalent à celui provoqué par la température souhaitée.