

Une bande avec une trajectoire centrée et stable dans le temps, ça existe ? ... Oui ! à condition que...

## Maîtrise de la trajectoire des bandes transporteuses et maîtrise des aléas

### 1<sup>ère</sup> partie : les prérequis

**pour garantir que les réglages seront définitifs dans le temps.**

Le convoyeur à bande transporteuse est une machine « compliquée », dont il faut « simplifier » l'équation et « neutraliser » les paramètres restants en maîtrisant les incertitudes de réglage. Notre article parut sous le titre « *Conception, Nouvelle Approche* », porte sur la simplification de la conception des convoyeurs. Il est essentiel à la compréhension de ces articles parties 1 & 2.

D'autre part, le meilleur réglage, avec des tolérances d'ajustement les plus serrées, n'apportera pas de résultat si les composants influents ne sont pas conformes. Ce sont les prérequis !

*Personne ne compte sur la bonne tenue de route de sa voiture, sur chaussée mouillée, si celle-ci a des pneus lisses, malgré un réglage parfait de la géométrie des trains roulants.*

#### Les éléments à considérer

- 1) Le produit manutentionné
- 2) La courroie transporteuse
- 3) Les tambours
- 4) Les supports de bande
- 5) Les accessoires (ex.: bavette, rives, racleurs, ...)
- 6) Les annexes (ex.: goulottes, dépoussiérage, ...)
- 7) Le châssis du convoyeur<sup>1</sup>
- 8) Les châssis annexes<sup>2</sup> (ex.: chariot verseur, pont d'alimentation, ...)
- 9) L'environnement.

#### Quelques généralités

Tous les composants, listés ci-dessus, génèrent ou supportent des forces ou ont des coefficients. Il suffit qu'un seul de ces composants ait une force, un coefficient variable pour que tous les autres composants du convoyeur voient les forces, les coefficients, qui leur sont affectés, fluctuer.

Cet état variable des forces et/ou coefficients entraîne une "trajectoire précaire et aléatoire" de la bande, si ces composants génèrent des forces de directions différentes à l'axe du convoyeur, du fait d'un contact par frottement.

#### Des questions à se poser

##### Position géométrique des composants du convoyeur

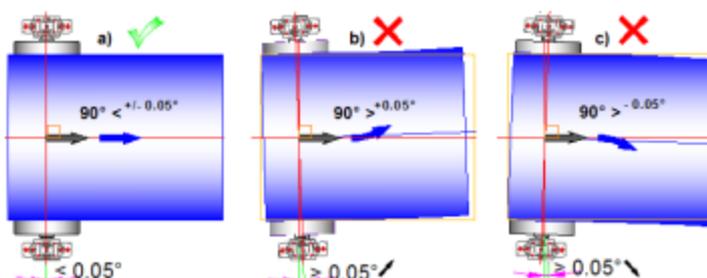
Sur les plans, les tambours et les rouleaux sont dessinés « perpendiculaires » à l'axe du convoyeur ; soit une valeur absolue de 90°.

Dans les faits, sur la machine, à partir de quelle tolérance de montage doit-on considérer que le composant n'est plus perpendiculaire à l'axe convoyeur ?

Est-ce que la valeur de tolérance sur la position géométrique de chaque composant est constante, quelle que soit la complexité du convoyeur ?

Ces questions prennent tout leur sens quand on sait que sur la plupart des plans de convoyeur, il n'y a pas de cotation angulaire (90°) ou de symbole de perpendicularité  $\perp$  des tambours et rouleaux et il n'y a pas de tolérance générale ou spécifique de montage.

**Figure 1.**  
Tolérance de réglage :  
a) conforme  
b & c) non conformes





### Forme des composants

La forme des composants, qui à première vue semble évidente, a également une influence sur la stabilité de trajectoire de la bande.

- Les tambours, les rouleaux, sont "cylindriques",
- La bande doit présenter une symétrie de forces (miroir) par rapport à son axe longitudinal.

Faut-il définir des tolérances de fabrication des composants et des tolérances sur leur déformation à venir (usure, pollution, fragilité, ...) ?

### Interface et surfaces de contact

Quelle est l'influence de la qualité de l'interface de contact entre deux composants (tambour/bande, rouleaux/bande, etc.)

Faut-il définir des critères de limite d'acceptabilité de ces interfaces de contact pour garantir la trajectoire de la bande ?

Puisque l'interface de contact entre deux composants peut être variable, quelles sont les qualités et les limites d'acceptabilité de la surface de chaque composant, pour garantir la trajectoire de la bande ?

### Effet immédiat ou différé et localisation de la conséquence

La difficulté de compréhension du fonctionnement du convoyeur tient au « moment dans le temps » et à la « localisation » de la conséquence !

Une variation d'état, de force ou de condition (ex. : coefficient) a un effet immédiat ou différé dans le temps, y compris après disparition de cette variation. De même, la localisation de la conséquence peut être très éloignée du point générateur du phénomène initial.

## ÉTUDE DES ÉLÉMENTS À CONSIDÉRER

Cette étude porte sur les facteurs pouvant perturber la trajectoire de la bande, hors des considérations sur le réglage des composants du convoyeur.

Ces facteurs sont issus de la modification de l'état d'un élément, en tant que source ou que conséquence, comme sa déformation momentanée ou permanente, consécutive:

- à un effort excessif,
- à un effort modéré et répété (phénomène de fatigue),

- à un apport ou un retrait de matière (colmatage par le produit, usure du composant).

### Produit manutentionné

Par nature, la bande manutentionne 0 % à 100 % du débit de produit à transporter, voire plus. C'est la 1<sup>ère</sup> variable à considérer.

Le ou les produits transportés par un convoyeur peuvent influencer la trajectoire de la bande au 1<sup>er</sup> jour de sa mise en service ou dans le temps.

Cette notion de "dans le temps", rarement perçue, est une cause fréquente de "bidouillage" des réglages initiaux des composants du convoyeur, au point de conduire le service de maintenance à truffer le convoyeur de dispositifs "autocentres", souvent peu ou pas efficaces et qui, parfois, aggravent la situation.

Ce constat fait que, d'origine, les constructeurs installent d'office des autocentres, parfois à la demande des exploitants au travers du cahier des charges.

Cette remarque sous-tend l'ampleur du problème et entache le haut niveau de sécurité normalement attendu !

### Exemple :

Dans le cas d'un produit avec une forte granulométrie, mélangée, initialement, de façon homogène puis avec les blocs concentrés sur un côté de bande, suite à une ségrégation au passage d'une goulotte de liaison, on pourra constater une dégradation, à terme, du côté de la bande subissant les impacts générés par la forte granulométrie. Ce dégât de la carcasse de bande, qui est souvent occulte, engendre des déports de bande dans le temps. CQFD !

Nota : Pour toutes les observations concernant des asymétries de chargement de la bande ou, plus généralement, les autres cas impliquant le produit manutentionné, se reporter aux articles pertinents ci-après.

Ces facteurs sont issus de la modification de l'état d'un élément, en tant que source ou que conséquence, comme sa déformation momentanée ou permanente, consécutive:

- à un effort excessif,

- à un effort important et répété (phénomène de fatigue),
- à un apport ou un retrait de matière (colmatage par le produit, usure du composant).

### Bande & jonction

La bande peut être incompatible avec le profil en auge des supports du convoyeur sur lequel elle est montée. La bande peut être trop « rigide » dans le sens transversal ou trop « souple ». Dans certains cas, pour la version trop raide, il est possible de résoudre le problème en augmentant le pas des supports ou en supprimant les rouleaux latéraux des auges sur un support sur deux ou plus. On peut aussi garder le pas initial entre supports mais utiliser un angle d'auge plus faible ( $45^\circ \rightarrow 30^\circ$ ). Sinon, il faut changer la référence de bande.

La bande peut présenter des anomalies et ou des déformations, ayant pour causes :

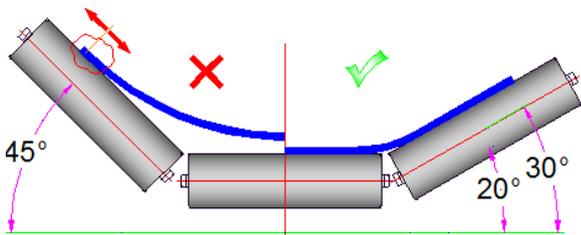


Fig. 2-1 : la bande est trop « rigide » / est « adaptée »

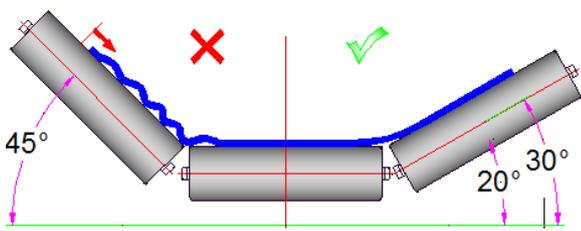


Fig. 2-2 : la bande est trop « souple » / est « adaptée »

#### a) Asymétrie de tension d'une bande neuve :

Cette asymétrie peut provenir d'un problème de fabrication ou de manipulation. Elle se corrige facilement, dès les 1<sup>ères</sup> heures de fonctionnement sur le convoyeur, à condition d'avoir un convoyeur parfaitement conforme et de connaître la méthode de correction (cf. 2<sup>ème</sup> partie de cet article, ... à venir).

Cette asymétrie est caractérisée par une différence de longueur des câbles de chaîne (tous ou une partie) entre les deux ½ nappes de la carcasse délimitée par l'axe longitudinal de la bande. Cette différence de longueur est à reconsidérer en "différence de forces", avec de fortes incidences de trajectoire, notamment dans les courbes concaves.

Pour préserver vos recours en garantie auprès du vendeur de la bande, il est très facile de mettre en évidence une telle anomalie. Pour cela, il est impératif de disposer d'un convoyeur parfaitement réglé, avec des composants conformes et des supports à rouleaux, brin retour, au pas minimum de 9 m et plus (12, 15 m).

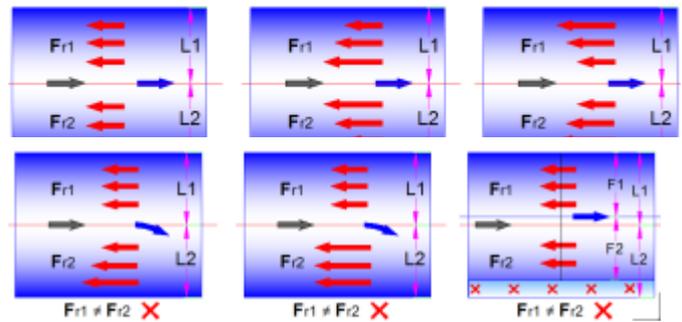


Figure 3.1 : Forces résistantes asymétriques à l'axe convoyeur

La mesure se fait brin retour dans la section de moindre tension, convoyeur à l'arrêt. Une simple observation peut être réalisée à distance, bande en marche, en sécurité.

Si vous constatez une différence d'altitude entre les bords droit et gauche de la bande, c'est qu'il y a une différence de tension entre les bords donc une différence de longueur des câbles. Cette affirmation ne vaut qu'à la stricte condition que tous les tambours et rouleaux soient parfaitement perpendiculaires à l'axe convoyeur et parallèle à son plan. Ce défaut peut être limité à un tronçon de bande.

Dans ce cas et sous condition d'un convoyeur parfait et parfaitement réglé, l'axe de symétrie des forces coïncidera avec l'axe convoyeur ; par contre, l'axe géométrique de la bande (½ largeur) en sera décalé

#### b) Asymétrie de tension, bande en exploitation :

Il s'agit de constater les mêmes différences de tension dans la bande, mais ayant pour origines des contraintes excessives lors de son exploitation.

Il est important de dire que ces dégâts occultes de la carcasse peuvent survenir très rapidement en moins d'une semaine ou après plusieurs années, même après 10 ans de service.

Ces dommages sont essentiellement issus de mauvais réglages des tambours, des rouleaux (cf. partie 2). Les anomalies décrites ci-après sont des facteurs aggravants.

#### c) Autres dommages affectant la bande :

Il y a de nombreux types de dommages. Cet article ne traite que ceux affectant sa trajectoire.

#### d) Jonction "douteuse" :

Il s'agit de la qualité de sa géométrie, caractérisée par un mauvais alignement des 2 extrémités de bande à jonctionner.

Un tel défaut, avéré<sup>3</sup>, a une incidence limitée sur le déport de bande. Il est observable quelques mètres avant la jonction et sur une longueur plus importante après son passage. Le problème doit être considéré, souvent, comme un facteur aggravant d'une situation dégradée plus générale.

.../...

Le point sensible reste un chargement décalé du produit sur la bande, au passage déporté de la jonction sous l'alimentation. Ce décalage initial du produit sur la bande devenant la cause du déport, pour les tronçons suivants la jonction en défaut.

### Tambour

S'il est évident que les tambours doivent être parfaitement réglés, c'est-à-dire que leur position géométrique sur le convoyeur est rigoureuse sous une tolérance serrée (ex. :  $90^{\circ \pm 0.03^{\circ}}$ ), il est tout aussi important de disposer de tambours de forme et de qualité de surface "conformes" aux règles de l'art.

L'importance de cette affirmation tient au fait que les tambours et composants assimilés<sup>4</sup> supportent des forces élevées, quand les rouleaux supportent des forces comparativement moindres.

Nota : la liste des défauts pouvant affecter la forme de la virole des tambours sont :

#### a) Concentricité, coaxialité à l'arbre :

Ce défaut de forme peut provenir d'une fabrication en tôle roulée, brut, non usinée après assemblage.

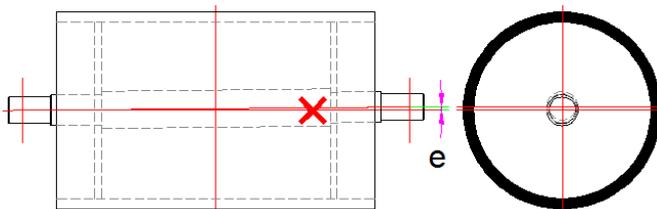


Figure 4 : arbre et virole non concentrique

#### b) Forme cylindrique :

Toutes les génératrices de la virole sont parallèles à l'axe de révolution, avec une tolérance d'usinage serrée ; une tolérance trop large est un défaut.

#### c) Forme "bombée" :

Il n'y a pas de norme ISO sur l'usinage bombée des viroles ; la seule norme disponible est NF T47004.

#### Les défauts récurrents sont :

- une erreur d'interprétation à l'usinage entre 1% de différence au diamètre du bord de virole avec le diamètre nominal et un usinage à 1% de pente de la section tronconique de la virole.
- Le cumul du bombé entre deux tambours successifs rapprochés (ex. : contrainte, déviation).
- Le colmatage de la partie milieu de la virole, souvent consécutive à une déformation transversale de la carcasse de bande (cf. : longueur de transition, ...).

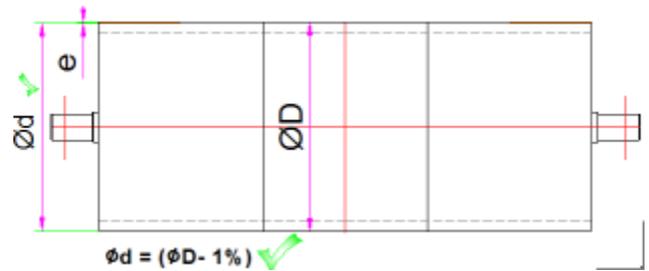


Figure 5.1 : virole bombée conforme

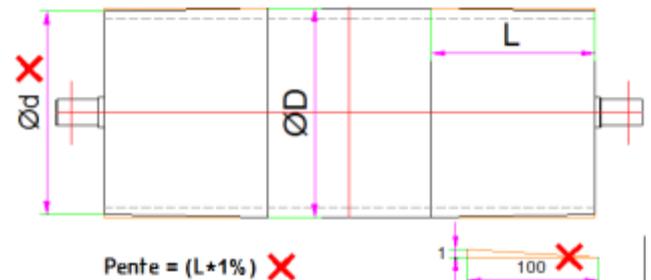


Figure 5.2 : virole bombée non conforme

#### d) Forme "concave" :

#### Une virole concave est interdite !

Il y a un défaut lorsque la virole présente un profil concave à partir d'une profondeur de l'ordre de 0.5 à 0.1 mm, selon le matériau de surface de la virole (acier, c/c, céramique à picots, ...). C'est cette valeur très faible qui rend le défaut difficilement perceptible.

#### Principe :

Si on admet que le profil convexe (bombé) de la virole ramène les bords de bande vers le milieu du tambour, jusqu'à trouver l'équilibre ; pour le profil concave le principe est le même mais de sens inverse. Ainsi, le bord de bande est tiré vers le bord de la virole et, lorsque le phénomène est enclenché, il ne fait que s'accroître.

#### Ce type de défaut a pour origine :

- Un usage concave (rarissime) ;
- Une déformation en « banane » de la virole, sous la pression de la bande. Dans ce cas, la surface du tambour "sous charge" présente bien un profil concave ; à l'inverse, ce profil est convexe (équivalent à un bombé) pour la surface de tambour non couverte par la bande. Ce défaut est particulièrement vicieux parce qu'il peut être aléatoire en fonction de la tension de la bande selon le moment de l'observation.

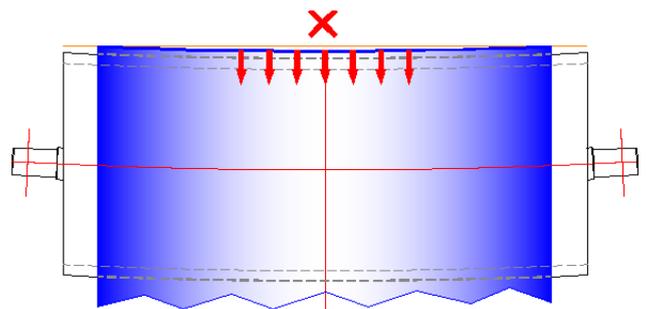


Figure 6.1 : profil concave sous contrainte de la bande

- L'usure de la virole, du fait d'une instabilité permanente de la bande, avec une amplitude sinusoïdale du déport (voir 2<sup>ème</sup> partie : guidage du tambour de tension, réglage des rouleaux).

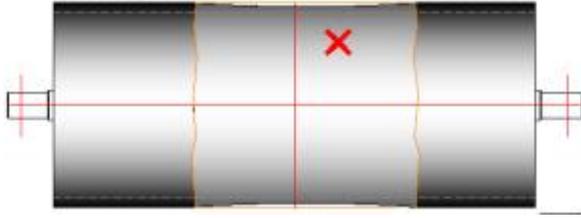


Figure 6.2 : profil concave par usure (instabilité bande)

Le cas le plus typique d'une usure de virole en profil concave concerne le tambour de déviation amont ou aval des systèmes de pré-tension à contrepoids à 3 tambours avec un déport à gauche sur le tambour de déviation et

un déport opposé à droite sur le tambour de tension au même moment, puis le sens des déports s'inversent avec une périodicité absolument régulière à la seconde près, du cycle "gauche – droite - gauche".

e) Qualité de surface :

La virole des tambours est en acier (sans revêtement), avec un revêtement caoutchouc lisse ou rainuré, de dureté d Shore et d'épaisseur e mm, avec un revêtement en amalgame de corindon, en céramique ( $Al_2O_3$ ) à picots, etc. La virole est constituée de barreaux (cage d'écureuil).]

Toutes ces qualités de surface, en contact avec la face de roulement de la bande, ont une influence directe sur la stabilité de trajectoire de la bande ; c'est le thème de cet article.

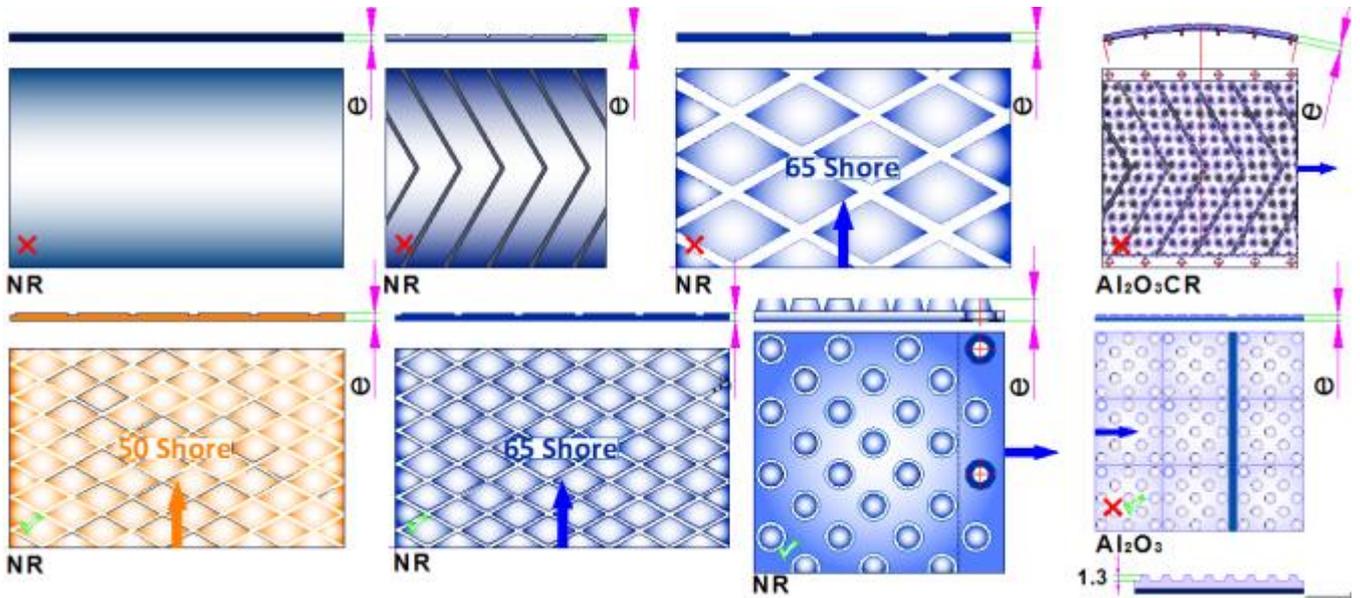


Figure 7 : différentes qualité et matière de revêtement de tambour

Tout le monde admet que le coefficient de frottement de l'acier est inférieur à celui des autres matériaux énumérés ci-dessus ; attention, les barreaux en acier des cages d'écureuil sont un cas particulier.

Tout le monde admet que garnir les tambours de commande d'un revêtement améliore leur capacité de traction. Il semble acquis qu'un revêtement "rainuré" est plus performant que la même qualité "lisse", puisque les polluants à l'interface bande/tambour seront contenus dans les rainures ; ainsi les points de contact bande/tambour restent propres.

Pour tous les autres tambours du convoyeur et du point de vue de la stabilité de trajectoire de la bande, pourquoi, si souvent, cette performance attribuée à un revêtement rainuré est oubliée ?

*Est-ce que l'on est sûr de la bonne tenue de route de sa voiture si les pneus des roues "non motrices" sont lisses ? NON !*

Pour garantir la stabilité de trajectoire de la bande, à partir d'un réglage fin de tous les composants du convoyeur, il est impératif que tous les tambours soient garnis de "caoutchouc rainurés petits losanges", de sorte que le moindre polluant, y compris une très fine couche de poussière de quelques microns, soit poussé dans les rainures, laissant les surfaces de contact propres avec un fort coefficient de frottement, de sorte à contenir les forces parasites<sup>5</sup> qui tendent à déporter la bande. CQFD !

Les autres types de revêtement de tambour seront traités dans un autre article.

### Les supports de bande

Ce sont essentiellement les rouleaux et les soles, les patins, les barres de glissement. Il est important de rappeler qu'un rouleau bloqué, sur un support, équivaut à un patin de glissement.

#### 1<sup>er</sup> Principe :

- Le contact « bande/rouleau » répond aux lois de direction et d'équilibre de forces.
- Le contact « bande/surface de glissement » répond à la loi d'équilibre de forces, seulement.

**Les supports glissants** n'ont pas de réglage à proprement parler. Les forces résistantes qu'ils génèrent dans la bande doivent être "parfaitement symétriques" par rapport à l'axe convoyeur.

**Les supports à rouleau(x)** doivent générer des forces parfaitement symétriques et parallèles ou convergentes à l'axe du convoyeur.

Les défauts récurrents, qui influencent la trajectoire de la bande, sont :

#### Supports glissants

- une différence de coefficient de frottement entre surfaces droite et gauche. Ces différences sont du type : mouillé/sec, pollué/propre, collant/non collant, charges faible/forte, sous vide d'air/avec air, ...).
- Une différence d'altitude entre chaque ½ plan à l'axe convoyeur, qui se traduit par une différence de pression de la bande.
- Une différence de qualité entre les supports droit et gauche ; ici, il faut considérer un rouleau libre et un rouleau bloqué présents sur le même support et en position symétrique. De fait, les forces résistantes à l'avance de la bande sont nettement différentes, ce qui implique un déport de bande malgré un support bien réglé.

#### Supports à rouleaux

##### Équilibre de forces :

- une différence de coefficient de frottement entre surfaces droite et gauche ; ces différences ont une influence que si le support à un « pincement »<sup>6</sup>

Ces différences sont du type : mouillé/sec, avec revêtement caoutchouc/métallique (nu)

##### Exemple :

- la bande est mouillée par la pluie, brin retour, d'un côté, puis cette eau mouille par transfert les rouleaux porteurs du même côté ;
- une suite de supports comporte un rouleau amortisseur d'un côté et un rouleau métallique nu de l'autre.

##### Direction de forces :

- les supports avec angle de "pincement"<sup>6</sup> ont un sens de montage qui impliquent des forces "convergentes" à l'axe convoyeur. À contrario, le

montage "à l'envers" du support implique des forces divergentes à l'axe convoyeur, qui conduisent au déport de la bande, souvent, avec une trajectoire sinusoïdale du fait d'autres forces agissant dans la bande.

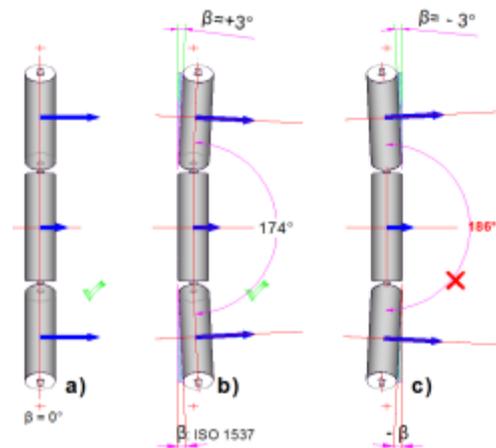


Figure 8 : Supports en auge à 3 rouleaux

a) sans pincement b) avec pincement c) monté à l'envers

- Les bandes à double sens de marche imposent des supports, brin porteur, sans pincement ; tout montage avec des supports avec pincement est à proscrire.
- La généralisation des rouleaux amortisseurs sur tout l'entraxe du convoyeur ou une grande longueur est à proscrire du fait de leur qualité de forme hors tolérance, si les supports ont un angle de pincement.

#### Les accessoires

Ce sont essentiellement les bavettes et rives de contenance. L'influence de ces deux accessoires sur la trajectoire de bande existe que s'ils génèrent une asymétrie de forces résistantes entre les côtés droit et gauche de la bande.

##### Exemple :

- Les bavettes sont en forte pression d'un côté du convoyeur et en faible pression de l'autre.
- Le produit frotte de façon intense sur une rive de contenance et frotte faiblement ou pas sur la rive opposée.

#### Les équipements annexes

Il s'agit essentiellement des goulottes d'alimentation, lorsqu'elles ne permettent pas de garantir, en toutes circonstances, le bon centrage du produit.

Depuis de nombreuses années, il y a un déficit sur la bonne conception des goulottes. Ce sujet sera présenté dans un prochain article.

#### Le châssis du convoyeur

Le châssis n'est pas directement en contact avec la bande et il ne fait pas l'objet de "réglage" à proprement parlé. Il est réputé avoir été érigé en suivant les repères du géomètre. Néanmoins, il est

pris en compte lorsqu'il permet une variation de la position géométrique des composants qu'il supporte, du fait d'un déplacement irrégulier ou de sa déformation.

#### Exemple :

- Le châssis est télescopique et/ou à inclinaison variable. Les convoyeurs comportant ce type de dispositif souffrent souvent d'un déficit sur les éléments de guidage et/ou d'articulation, qu'ils soient neufs ou usés (jeu mécanique trop important).
- Le châssis est sensible au vent latéral, pour la section en porte-à-faux (convoyeur de mise en stock) ; de fait le tambour en extrémité de flèche se déplace latéralement.
- Le tambour de commande en tête est monté sur une section en porte-à-faux et il y a un seul groupe d'entraînement suffisamment lourd pour vriller le châssis. Le tambour de tête et les supports à rouleaux sont bien réglés et à la mise en service de la bande, celle-ci est centrée sur l'axe convoyeur. Après quelque temps d'exploitation la bande se déporte ! Ici, c'est la déformation asymétrique de la bande engendrée par la vrille du châssis qui génère une différence de tension entre les bords droit et gauche de la bande.
- Le convoyeur est monté rigide dans une structure portante qui est exposée au soleil. Le rayonnement solaire du matin dilate la structure d'un seul côté et, de fait, courbe le convoyeur. Dans la journée, la température de la structure s'homogénéise et le problème disparaît.
- Le châssis du convoyeur est monté sur une structure soumise à des vibrations (crible, broyeur, etc.). Ces interférences amplifient le moindre défaut de réglage. La bande se déporte avec les vibrations et reste stable sans vibration.

#### Les châssis annexes mobiles

Il s'agit, essentiellement des chariots de tension, des chariots de mise en stock, des ponts d'alimentation, pour lesquels la qualité du dispositif de guidage souffre souvent d'un déficit, qu'ils soient neufs ou usés. Les défauts récurrents sont un jeu excessif entre l'élément mobile de guidage (patin, roue à épaulement, galet) et le rail de guidage et un empattement trop court entre les éléments de guidage par rapport à la voie (distance entre les rails droit et gauche).

#### L'environnement

L'environnement du convoyeur a une influence sur la trajectoire de la bande, malgré des composants parfaitement réglés, lorsqu'il génère des forces parasites, des coefficients différents entre les ½ largeurs droite et gauche de la bande,

#### Exemple :

- Le vent de travers au convoyeur, qui pousse la bande latéralement, notamment dans des sections sensibles comme les courbes concaves.
- La pluie, poussée par un vent de travers, qui mouille la face de roulement (face inférieure) d'un seul côté de la bande. Rapidement, cette eau va mouiller les rouleaux latéraux du brin porteur, du même côté du convoyeur, pour des rouleaux secs sur le côté opposé. Dans ce cas, il y aura déport de bande que si les supports sont "avec pincement".
- Idem ci-dessus, pour la poussière ou toute autre matière qui tombe asymétriquement sur la bande et pollue un seul côté de celle-ci ; par exemple, une fuite de matériau en provenance des machines installées au-dessus du convoyeur ; une alimentation en vapeur (convoyeur de boulangerie) d'un seul côté du convoyeur, avec une condensation sur les soles de glissement que d'un côté.



Figure 9 : voir en 2<sup>ème</sup> partie « les réglages » !

## CONCLUSION

**Négliger les prérequis décrits dans cet article a comme conséquence certaine une inefficacité des réglages des composants dont les subtilités et les méthodes seront décrites dans la 2<sup>ème</sup> partie à venir.**

<sup>1</sup> Le châssis : il est pris en compte lorsqu'il permet une variation de la position des composants qu'il supporte, du fait de sa déformation

<sup>2</sup> Les chariots, les ponts d'alimentation, les éléments télescopiques : ils sont pris en compte lorsqu'ils permettent une variation de la position des composants qu'ils supportent.

<sup>3</sup> Avéré : L'expérience montre que, souvent, par manque d'argument pertinent, la jonction est mise en cause pour expliquer l'instabilité de trajectoire de la bande, en masquant ainsi une réalité de défauts plus étendus.

<sup>4</sup> Composants assimilés : les courbes convexes, constitués d'une suite de supports à rouleaux, sont assimilées à un secteur de tambour imaginaire ; de fait, il s'applique les mêmes règles que celles des tambours.

<sup>5</sup> Force parasite : toute force, appliquée à la bande, dans une direction différente par rapport à l'axe du convoyeur

<sup>6</sup> Pincement : vue de dessus, c'est l'angle formé par l'axe des rouleaux latéraux d'un support. Il est  $>$  à  $180^\circ$  (cf. ISO 1537 #4.3.2)

**Marc des Rieux, Expert**

✉ [marc.desrieux@c3-expert.com](mailto:marc.desrieux@c3-expert.com)

🌐 [www.c3-expert.com](http://www.c3-expert.com)

**NB :**

Nous attendons vos commentaires sur ce texte qui établit l'état de l'art. .

Cet article a été publié / This article was published in :  
**Mines & Carrières** Février 2018, n°255, pages 22 à 28