

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR – ANNABA



جامعة باجي مختار – عنابة

Année: 2018/2019

Faculté des Sciences de l'Ingéniorat

Département d'Electromécanique

Thèse

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat

Intitulée

***SURVEILLANCE ET DIAGNOSTIC DES CONVOYEURS
A BANDE***

Option : Génie Industriel

Par: **DJOUEMA Naima**

Soutenue le 21 /02/2019

Devant le jury

Président :	Pr. SAAD Salah	Université Badji Mokhtar - Annaba
Directeur de thèse:	Pr. BELHAMRA Ali	Université Badji Mokhtar - Annaba
Examineurs :	Pr. HADJADJ AOUEL Ilias	Université Badji Mokhtar - Annaba
Examineurs :	M.C.A.GHEMARI Zine	Université M'sila
Examineurs :	M.C.A.BERRABAH Fouad	Université M'sila

Remerciements et dédicaces

Remerciements

Mes remerciements s'adressent en premier lieu à toutes les personnes qui ont permis le bon déroulement de ces travaux de thèse.

Je remercie sincèrement monsieur Ali BELHAMRA, Professeur à l'université Badji Mokhtar Annaba, pour le sujet qu'il m'a proposé, les conseils prodigués et pour la confiance qu'il m'a accordée tout au long de cette thèse et pour m'avoir orienté pendant toute la durée de ce travail et pour sa contribution à son enrichissement.

Je souhaite exprimer mes remerciements au directeur du laboratoire des systèmes électromécanique, monsieur SAAD SALAH Professeur à l'université Badji Mokhtar Annaba, qui a assuré le suivi de mes travaux en me fournissant le support scientifique et les conseils nécessaires à ma formation durant la préparation de ma thèse et pour m'avoir fait l'honneur d'accepté de présider le jury de soutenance.

Je remercie chaleureusement Monsieur HADJADJ AOUL Elias, Professeur à l'université Badji Mokhtar Annaba, pour avoir « co-encadré » cette thèse de manière officieuse, pour ses compétences et tous les précieux conseils qu'il a apportés et d'avoir accepté d'être examinateur et membre de jury.

Je remercie, Monsieur GHEMARI ZINE maitre de conférences à l'université M'SILA d'avoir accepté d'être examinateur et membre de jury.

Je remercie aussi, Monsieur BERRABAH FOUAD maitre de conférence à l'université M'SILA pour leur participation comme examinateurs et membre à mon jury de thèse.

Enfin j'accorde une mention spéciale à mon mari, ainsi que ma famille qui est une source permanente de motivation et de bonheur.

Dédicaces

A ma mère,

A mon père,

A mon mari,

A mon frère et mes sœurs,

A toute ma famille,

A mes amis.

Naima

Sommaire

Remerciement et dédicaces	
Sommaire	
Symbole	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Résumé	
ملخص	
Abstract	
Introduction générale.....	1

Chapitre I. Etude et conceptions des convoyeurs à bande

I.1	Introduction.....	4
I.2	Types et configurations des convoyeurs à bande.....	5
I.3	Caractéristiques techniques d'unconvoyeur à bande.....	6
I.4	Composants et leurs dénominations et dimensions.....	7
I.4.1	La bande.....	8
I.4.1.1	Types de la bande transporteuse.....	8
I.4.1.2	Capacité volumétrique de la bande.....	8
I.4.1.3	Profils de la bande.....	11
I.4.1.4	Vitesse de la bande.....	11
I.4.1.5	Largeur de la bande.....	13
I.4.1.6	Les tensions sur les brins de la bande.....	14
I.4.2	Les tambours.....	15
I.4.2.1	Tambour d'entraînement.....	15
I.4.2.2	Tambour de renvoi.....	16
I.4.2.3	Tambours de contrainte.....	16
I.4.2.4	Diamètres des tambours.....	17
I.4.3	Les rouleaux de supports.....	17
I.4.3.1	Les rouleaux de supports supérieurs.....	18
I.4.3.2	Les rouleaux de supports inférieurs.....	18
I.4.3.3	Ecartement des rouleaux de supports.....	18
I.4.4	Dispositifs de tension.....	20
I.4.5	Système de chargement.....	20
I.4.6	Dispositifs de nettoyage.....	20
I.5	Propriétés physiques des produits transportés.....	21
I.6	Conclusion.....	22

Chapitre II. Contrôle de la vitesse des convoyeurs à bande

II.1	Introduction.....	23
II.2	Convoyeurs à bande typique.....	23
II.3	Solutions pour réduire la consommation d'énergie des convoyeurs à bande.....	25
II.4	Régimes de fonctionnement des convoyeurs à bande.....	26

II.4.1	Le régime stationnaire	27
II.4.2	Le régime transitoire	27
II.5	Contrôle de la vitesse des convoyeurs à bande.....	27
II.6	Principe du contrôle de la vitesse.....	28
II.7	Conditions préalables du système de contrôle de vitesse.....	29
II.7.1	Les variateurs de la vitesse.....	29
II.7.1.1	Variateur de vitesse mécanique.....	29
II.7.1.2	Variateur de vitesse électronique.....	31
II.7.2	Dispositif de détection de débit du matériau.....	32
II.8	Contrôle de la vitesse pendant le régime transitoire.....	32
II.9	Risques pendant le régime transitoire.....	33
II.9.1	Rupture de la bande au niveau des jonctions.....	34
II.9.2	Glissement de la bande autour de tambour d'entraînement.....	35
II.9.3	Déversement de la matière loin de la bande.....	36
II.9.4	Surchauffe du moteur.....	37
II.10	Modèle d'énergie du convoyeur à bande.....	37
II.10.1	Résistances principales F_H	38
II.10.2	Résistances secondaires F_N	38
II.10.3	Résistances dues à l'inclinaison F_{St}	39
II.10.4	Résistances spéciales F_S	39
II.11	Conclusion.....	41

Chapitre III. Surveillance et diagnostic des convoyeurs à bande

III.1	Introduction.....	42
III.2	Fiabilité des convoyeurs à bande.....	43
III.3	Surveillance des convoyeurs à bande.....	44
III.4	Techniques de surveillance des convoyeurs à bande.....	44
III.4.1	Surveillance de l'état de la bande.....	46
III.4.1.1	Surveillance de la surface extérieure de la bande.....	46
III.4.1.2	Surveillance de la surface intérieure de la bande.....	46
III.4.1.3	Surveillance des jonctions.....	47
III.4.2	Surveillance de la vitesse de la bande.....	47
III.4.3	Surveillance de la force, la tension et le couple.....	48
III.4.4	Surveillance des vibrations.....	48
III.4.5	Surveillance du désalignement de la bande.....	50
III.4.6	Surveillance de la température.....	50
III.5	Diagnostic des défauts des convoyeurs à bande.....	51
III.5.1	Diagnostic par les méthodes internes.....	52
III.5.2	Diagnostic par les méthodes externes.....	53
III.5.3	Diagnostic par les méthodes inductives.....	54
III.5.4	Diagnostic par les méthodes déductives.....	54
III.6	Stratégies de la maintenance des convoyeurs à bande.....	54
III.6.1	Opération de la maintenance préventive.....	54
III.6.2	Opérations de la maintenance corrective.....	55
III.7	Conclusion.....	57

Chapitre IV. Modélisation et simulation de facteur de traction

IV.1	Introduction.....	58
------	-------------------	----

IV.2	Théorie de la transmission de l'effort de traction par tambour moteur.....	59
IV.3	Analyse des réserves de force de traction du convoyeur.....	62
IV.4	Simulation de modèle mathématique.....	67
IV.5	Résultats de l'expérience.....	68
IV.5.1	Résultats des essais sur le premier convoyeur à bande.....	68
IV.5.2	Résultats des essais sur le deuxième convoyeur à bande.....	69
IV.6	Discussion des résultats de l'expérience.....	70
IV.7	Conclusion.....	73
	Conclusion générale.....	75
	Bibliographie	

Symbole

Symboles

F_u	Effort tangentiel total	daN
V	Vitesse de la bande	m/s
η	Rendement de système de convoyeur	–
I_v	Capacité de charge de la bande	t/h
q_s	Masse volumique du produit	t/m ³
q_G	Poids du produit par mètre linéaire	Kg/m
T_1	Tension sur le brin supérieur de la bande	daN
T_2	Tension sur le brin inférieur de la bande	daN
f_a	Coefficient de frottement entre la bande et le tambour en fonction de l'angle d'enroulement	–
e	Basse logarithmique naturelle qui est égale à 2,718	2.718
a_0	Ecartement des stations supérieures	m
a_u	Ecartement des stations inférieures	m
a_i	L'incurvation de la bande entre deux stations porteuses	m
I_{VT}	Volume transporté à une vitesse de 1 m/s	m ³ /h
A_{nom}	Section nominale d'un convoyeur à bande	
ρ_s	Densité du matériau solide en vrac transporté	Kg/m ²
V_{nom}	Vitesse nominale du convoyeur à bande	m/s
V_{nom}	Vitesse nominale	m/s
V_{act}	Vitesse réelle non nominale (inférieur à la vitesse nominale)	m/s
Q_{act}	Taux d'alimentation réel	
Q_{nom}	Capacité nominale de convoyeur	t/h
A_{act}	Section transversale du matériau sur la bande lorsque le convoyeur tourne à la vitesse nominale	M ²
$S_{A,min}$	Facteur de sécurité minimum dans les opérations stationnaires	–
$S_{B,min}$	Facteur de sécurité minimum dans les opérations transitoires	–
$T_{max;A}$	Tension maximale de travail en sécurité dans les opérations stationnaires	daN
$T_{max;B}$	Tension maximale de travail en sécurité dans les opérations transitoires	daN
k_N	Tension de la bande ou résistance à la rupture minimale	daN
P_m	Puissance mécanique	Kw
F_d	Forces d'entraînement exercées sur le tambour d'entraînement	daN
P_e	Puissance électrique	Kw
τ_{sys}	Rendement de système de convoyeur à bande	–
F_d	Forces motrices	daN
F_f	Résistances totales de mouvement le long du trajet de transport	daN
F_H	Résistance principale	daN
F_N	Résistances secondaires	daN
F_{St}	Résistances due à l'inclinaison	daN
F_S	Résistances spéciales	daN
L	Longueur du convoyeur	m
m'_{roll}	Masse métrique des rouleaux intermédiaires	Kg/m
m'_{belt}	Masse métrique de la bande	Kg/m
m'_{bulk}	Masse métrique de la matière solide en vrac sur la bande	Kg/m
δ	Angle d'inclinaison d'un système de convoyeur à bande	[°]
$F_{Au f}$	Résistance de frottement entre le matériau transporté et la bande dans la zone d'alimentation	KN

F_{Schb}	Résistance de frottement entre la bande transporteuse et les goulottes dans la zone d'accélération d'un point d'alimentation	KN
F_{Gr}	Résistance de friction causée par le dispositif de nettoyeurs de la bande	KN
F_{Gb}	Résistance à la flexion de la bande transporteuse où elle passe sur un tambour	KN
F_{Tr}	Résistance des paliers des tambours non entraînés	KN
H	Hauteur du convoyeur à bande	m
F_{Rst}	Résistance à l'inclinaison sur les rouleaux porteurs supérieurs	KN
F_{Sch}	Résistances de frottement supplémentaires de la goulotte	daN
F_{Ga}	Résistances de raclage	daN
R_i	Fiabilité de la composante i	–
KB	Représente la base de connaissances	–
DAC	Représente l'acquisition de données	–
DAN	Représente l'analyse des données	–
S	Espacement des puces de transpondeur	m
S_{ref}	Quantité prédéterminée	kg
dF_N	Force normale	daN
μ	Coefficient de frottement entre la bande et le tambour d'entraînement	–
μdF_N	Force de frottement maximal sans patinage de la bande	daN
$e^{\mu\alpha}$	Facteur de traction réel du convoyeur à bande obtenu d'après la construction	–
l_r	Distance entre les rouleaux porteurs	m
T_{min}	Tension minimale sur la bande	daN
T_{adm}	Tension admissible de la bande	daN
T_{rup}	Force de rupture de la bande	daN
σ_r	Résistance spécifique à la rupture	daN
i	Nombre de plis de la bande	–
m	Facteur de sécurité	–
q_{ch}	Masse métrique de la charge	Kg/m
q_b	Masse métrique de la bande	Kg/m
W_{2-1}	Résistances au mouvement des brins, vide et Chargé	daN
W_{4-3}		
ω_v	Résistances spécifiques au mouvement correspondantes	daN
ω_{ch}		
L_{adm}	Longueur admissible du convoyeur	m
q_r', q_r''	Respectivement les masses métriques des rouleaux supérieur et inférieur	Kg/m
« a »	Facteur de traction réel	–

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre I. Etude et conception de convoyeur à bande

Figure I.1	Type et configuration des convoyeurs à bande.....	5
Figure I.2	Schéma de principe d'un convoyeur à bande.....	7
Figure I.3	Coupe transversale de la bande transporteuse.....	8
Figure I.4	Angle de talutage.....	10
Figure I.5	Angle d'éboulement.....	11
Figure I.6	La largeur de la bande.....	13
Figure I.7	Tensions exercées sur la bande au niveau du tambour de commande.....	14
Figure I.8	Emplacement des tambours.....	15
Figure I.9	Comparaison entre les deux systèmes d'entraînement.....	16
Figure I.10	Ecartement des rouleaux des supports.....	18
Figure I.11	Les rouleaux des supports.....	20

Chapitre II. Contrôle de la vitesse de convoyeur à bande

Figure II.1	Composants et assemblage du convoyeur à bande	23
Figure II.2	Section transversale du brin vide et chargé du convoyeur à bande.....	24
Figure II.3	Les régimes stationnaires de convoyeur à bande.....	27
Figure II.4	Le régime transitoire du convoyeur à bande (cyclo gramme).....	27
Figure II.5	Principe du contrôle de la vitesse.....	28
Figure II.6	Variateur de la vitesse à courroie trapézoïdale.....	30
Figure II.7	Variateur de la vitesse à engrenage.....	31
Figure II.8	Variateur de vitesse à fréquence variable.....	32
Figure II.9	Les outils de mesures de débit du matériau.....	32
Figure II.10	Rupture de la bande au niveau des jonctions.....	34
Figure II.11	Usure du garnissage du tambour moteur.....	35
Figure II.12	Déversement de la matière.....	36

Chapitre III. Surveillance et diagnostic des convoyeurs à bande

Figure III.1	Inspection humaine du convoyeur à bande.....	45
Figure III.2	Surveillance de la surface extérieure de la bande.....	46
Figure III.3	Surveillance de la surface intérieure de la bande.....	47
Figure III.4	Surveillance des jonctions de la bande par les rayons X.....	47
Figure III.5	Surveillance de la vitesse de la bande par tachymètre.....	48
Figure III.6	Détection des défauts par l'analyse vibratoire.....	49
Figure III.7	Le rouleau du support intelligent.....	49
Figure III.8	Surveillance du désalignement de la bande.....	50
Figure III.9	Détection des défauts par la caméra infrarouge.....	50
Figure III.10	Surveillance de température à base des fibres optiques.....	51

Chapitre IV. Modélisation et simulation de facteur de traction

Figure IV.1	Principe d'entraînement par frottement du convoyeur à bande.....	60
Figure IV.2	Diagramme de tension du convoyeur à bande.....	63
Figure IV.3	Mise en évidence du facteur de traction.....	66
Figure IV.4. (a)	Courbes obtenues avec la variation de la tension minimale.....	68

Figure IV.4. (b)	Courbes obtenues avec la variation de la charge.....	69
Figure IV.4. (c)	Courbes obtenues avec la variation simultanée de la charge et de la tension	69
Figure IV.5. (a)	Courbes obtenues avec la variation de la tension minimale.....	69
Figure IV.5. (b)	Courbes obtenues avec la variation de la charge.....	70
Figure IV.5. (c)	Courbes obtenues avec la variation simultanée de la charge et de la tension.....	70

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau I .1	Débit volumétrique avec stations supports en auge à 3 rouleaux.....	10
Tableau I .2	Vitesses maximales conseillées.....	12
Tableau I .3	Largeur minimale de la bande.....	13
Tableau I .4	Diamètres minimaux recommandés pour les tambours.....	17
Tableau I .5	Ecartement entre les stations supports.....	19
Tableau I .6	Propriétés physiques des produits transportés.....	21
Tableau III.1	Paramètres et techniques de surveillance du convoyeur à bande.....	45
Tableau IV.1	Caractéristiques des convoyeurs	68
Tableau IV.2	Paramètres des convoyeurs obtenus par calcul.....	68

Résumé

Résumé

Les caractéristiques dynamiques d'un convoyeur à bande sont déterminées principalement par les propriétés de la bande, ses caractéristiques dynamiques déterminent les performances de fonctionnement des convoyeurs à bande.

Actuellement, les recherches expérimentales sur les caractéristiques dynamiques des bandes transporteuses sont principalement axées sur le test du module d'élasticité dynamique et de l'amortissement visqueux, peu de recherches sur d'autres paramètres dynamiques ont été menées.

Cette thèse est axée sur la capacité de traction du convoyeur à bande et son effet sur le fonctionnement du système, la relation entre la traction d'entrée et la sortie de tambour d'entraînement est exprimée en équations mathématiques prenant en compte les caractéristiques techniques de la bande, les conditions de configuration du convoyeur et son utilisation.

Le modèle développé dans ce travail peut être utilisé comme un outil de diagnostic pour contrôler les limites d'élasticité de la bande pour éviter de glisser entre la bande et le tambour d'entraînement.

La simulation du processus de transmission de l'effort moteur à la bande et de son adhérence avec le tambour d'entraînement fournit un contrôle parfait de la capacité du convoyeur et du facteur de traction.

Cela permettra d'évaluer et d'estimer les réserves d'adhésion et de prévoir les risques de glissement.

Cette approche peut assurer la surveillance et le diagnostic du convoyeur à bande afin d'éviter une usure excessive de la bande pour éviter les défaillances.

Mots clés : *convoyeur à bande, surveillance, diagnostic, facteur de traction, transmission des efforts*

ملخص

ملخص

الحزام الناقل هو أهم عنصر في تركيبة الأحزمة الناقلة من ناحية ثمنه الباهظ وسرعة تعرضه للإعطاب خاصة في مدخل ومخرج بكرة القيادة حيث تكون قوة الشد كبيرة مما يؤدي إلى انزلاق الحزام حول البكرة ومن ثم تمزقه ومن أجل الاستعمال الآمن والدائم للحزام ارتكزنا في هذا العمل على التشخيص المبكر للحزام من خلال تطوير معادلات رياضية تعبر عن العلاقة الموجودة بين قوى الشد في مدخل ومخرج بكرة القيادة مع الأخذ بعين الاعتبار الخصائص التقنية للحزام وزاوية ميلان الناقل وطبيعة الشحنة المراد نقلها إضافة إلى عدت عوامل أخرى .

بعد تطوير هذه المعادلات نقوم بتطبيقها تجريبيا من خلال برنامج محاكاة يمكننا من السيطرة على حدود مرونة الحزام ويسمح لنا بتحديد أفضل المناطق للاستعمال الجيد و الأمن للحزام كما يعتبر هذا النوع من التشخيص الداخلي من أفضل أنواع التشخيص لأنه يمكننا من تجنب عدة مخاطر مرتبطة باستعمال الأحزمة الناقلة في المستقبل.

الكلمات المفتاحية: الأحزمة الناقلة, التشخيص, المراقبة, عامل الشد, نقل القوى

Abstract

Abstract

The belt is the main component of conveyors; its dynamic characteristics determine the operating performances. Recent reported literature on the dynamic characteristics of conveyor belts are focused on testing dynamic elastic modulus and viscous damping. Little research on other dynamic parameters has been conducted.

The present thesis is focused on belt conveyor traction capacity and its effect on system operation. The relation between input tensile and drive pulley output are expressed in mathematical equations taking in account belt technical characteristics, conveyor setup conditions and utilization. The model developed in this work can be used as a tool to control elasticity limits of the belt to avoid slipping between belt and drive pulley.

The simulation of motor effort transmission process to the belt and its adhesion with the drive pulley provides a perfect control of conveyor capacity and traction factor. This will enables to evaluate and estimate adhesion reserves and to predict slipping risks. This approach can ensure belt conveyor control and monitoring to avoid excessive belt wear to prevent failures.

Key words: *belt conveyor, monitoring, control, traction factor, belt transmission*

Introduction générale

Introduction générale

Les convoyeurs à bande jouent un rôle important dans le transport continu de matériaux solides en vrac [1].

Selon les exigences actuelles, les constructions des convoyeurs à bande sont développés par l'augmentation de débits des matériaux, l'utilisation des systèmes d'entraînement électriques pour garantir la régularité de la mise en marche, la régularité de la vitesse de rotation des tambours moteurs avec la vitesse de déplacement de la bande en fonction de la charge réelle pour éviter la rupture de la bande transporteuse...etc. [2],[3].

L'exploitation rationnelle des convoyeurs à bande est une mission complexe car elle dépend de plusieurs paramètres qui passent en premier lieu par une bonne maintenance du système électromécanique (révision et surveillance) de toutes les parties en mouvement, et la création de condition dynamiques acceptables lors des processus transitoires, processus, durant laquelle la bande subissant des tensions supplémentaires en plus du patinage.

Ce qui accélère la fatigue et la déchirure de la bande, surtout que le prix de la bande seule représente 60% des prix de l'installation [4], [5], [6].

Les convoyeurs à bande à grande échelle consomment une quantité considérable d'électricité [7], [8].

Au cours des dernières décennies, plusieurs solutions d'économie d'énergie ont été proposées pour réduire la consommation d'énergie des convoyeurs à bande [9], [10].

Quelques études portent sur la dynamique des convoyeurs à bande en fonctionnement transitoire, Il n'y a cependant aucune étude décrivant le fonctionnement des convoyeurs à courroie à vitesse contrôlée pendant le fonctionnement transitoire [11], [12], [13].

L'approche du contrôle de la vitesse est importante, en général le convoyeur à courroie tourne à sa vitesse nominale en régime permanent et l'utilisation moyenne de la courroie est inférieure à la capacité théorique, cela peut être causé par des variations temporaires ou cycliques du débit de produit en vrac évacué sur le convoyeur [14], [15], [16].

L'approche consistant à contrôler la vitesse de la courroie de telle sorte que la capacité volumétrique de la courroie soit pleinement utilisée dans toutes les conditions de fonctionnement a prouvé qu'elle réduisait sensiblement la consommation d'énergie d'un convoyeur à bande [17], [18].

Les recherches actuelles sur le contrôle de la vitesse pour les convoyeurs à bande se concentrent principalement sur le calcul et la prévision des économies d'énergie possibles[19], [20].

La norme DIN (spécialement DIN 22101) suggère que des économies d'énergie considérables peuvent être réalisées en abaissant la vitesse du convoyeur et en améliorant l'utilisation de la courroie [21], [22].

Pang [26], [27] suggère qu'en régime transitoire, la grande accélération peut entraîner des dommages aux composants du convoyeur ou même un dysfonctionnement total de l'ensemble du convoyeur. Donc, en fonctionnement transitoire, le temps d'accélération doit être suffisamment important pour éviter les risques.

Dans cette thèse les risques potentiels en fonctionnement transitoire sont discutés, les risques comprennent principalement la rupture de la bande dans la zone des jonctions, le glissement de la bande autour de tambour d'entraînement ou de frein, la surchauffe du moteur et le déversement de matériaux [28], [29], [30].

Pour éviter les risques mentionnés et réaliser un fonctionnement transitoire approprié avec un temps d'accélération minimum il faut appliquer une méthode de contrôle de la vitesse adapte, cette méthode tient compte à la fois des risques potentiels et de la performance dynamique du convoyeur à bande [31], [32].

Le diagnostic des défaillances des systèmes du convoyeur à bande, qui fait partie de la sureté de fonctionnement, lorsqu'il est réalisé avec efficacité, représente un des moyens pour contribuer à obtenir un meilleur gain de productivité. Sa vocation première est de détecter et de localiser une défaillance des leurs composants [33], [34], [35].

Dans certaines applications où les systèmes de convoyeur sont intégrés et souvent interconnectés, il est devenu primordial de diagnostiquer des défauts dès leur naissance, car une panne dans l'un des organes constitutifs de convoyeur peut arrêter tout le processus de production, ce qui cause des pertes financières lourdes [36], [37].

L'un des objectifs de notre travail est l'établissement de modèle suffisamment précis permettant de déterminer le comportement réel de convoyeur à bande.

A partir de la théorie d'Euler nous avons mis en évidence le facteur de traction réel « a » dans l'objective d'une exploitation réussi du point de vue capacité ; rentabilité ; et surveillance.

Dans ce contexte, le mémoire comporte quatre chapitres. Le premier présente une synthèse sur les types et les configurations des convoyeurs, les différents types de produits à transporter ainsi les caractéristiques techniques d'un convoyeur à bande et les différentes composants et leurs dénominations et dimensions.

Le deuxième chapitre propose une méthode d'ajustement de la vitesse pour réduire la consommation d'énergie des convoyeurs à bande afin d'atteindre une capacité maximale de

transports des matériaux, nous présentons les différentes solutions pour réduire la consommation d'énergie et le contrôle de la vitesse dans les opérations transitoires, ainsi que la détermination de modèle de conversion d'énergie du convoyeur à bande avec évaluation des points de résistance à la transmission.

Le troisième chapitre est consacré à la fiabilité du convoyeur à bande, la classification des méthodes de diagnostic des défauts et à l'approche de diagnostic de système sur lesquelles nous avons appuyé nos travaux, nous présentons ensuite les divers outils et techniques de surveillance des convoyeurs à bande, et les différentes opérations de la maintenance effectuées sur le système de convoyeur à bande.

Le chapitre 4 est concentré sur la mise en place de notre système de diagnostic aux convoyeurs à bande par l'amélioration de facteur de traction de conception (e^{fa} coefficient) afin d'augmenter le rendement de la machine, et la durée de vie de la bande, et de contrôler et surveiller avec des phénomènes de glissement de haute précision.

Ce chapitre est axé sur la capacité de traction du convoyeur à bande et son effet sur le fonctionnement du système.

La relation entre la traction d'entrée et la sortie de tambour d'entraînement est exprimée en équations mathématiques prenant en compte les caractéristiques techniques de la bande, les conditions de configuration du convoyeur et son utilisation.

Le modèle développé dans ce chapitre peut être utilisé comme un outil du diagnostic pour contrôler les limites d'élasticité de la bande pour éviter le glissement entre la bande et le tambour d'entraînement à des fins de surveillance.

Nous terminons ce chapitre par des tests expérimentaux ont été réalisés pour valider le modèle développé en utilisant la simulation par ordinateur.

Dans cette partie, la variation du facteur de traction dans les conditions réelles est observée avec la rupture totale de la bande pour deux convoyeurs à bande.

Un programme de calcul du facteur de traction est programmé en fonction de l'inclinaison des convoyeurs.

Ce programme permet d'obtenir des courbes de facteur de traction par rapport à l'angle d'inclinaison avec possibilité de faire varier la tension minimale, la charge et les deux simultanément afin de simuler les conditions de travail réelles du convoyeur à bande.

Les résultats de l'expérience sont présentés et discutés, et enfin nous terminons cette thèse par une conclusion sur l'ensemble de cette étude, ainsi que par des perspectives à envisager pour d'éventuelles suites de ce travail.

Chapitre I

Etude et conceptions des convoyeurs à bande

I.1 Introduction

Le domaine de prédilection du convoyeur à bande est le transport de tous les matériaux en général notamment, les minerais et ce dans tous les secteurs industriels.

Au cours de la phase d'étude d'un projet de manutention de matières brutes ou de produits finis, le choix du mode de transport doit privilégier la solution qui présente le meilleur rapport coût/efficacité en fonction du volume des produits transportés, du matériel, de la maintenance, de sa souplesse d'adaptation et de son aptitude à transporter diverses charges et même à accepter des périodes de surcharge [1].

Actuellement, il ne s'agit plus uniquement des convoyeurs horizontaux ou inclinés, mais également des courbes, des convoyeurs présentant une forte déclivité et des vitesses de plus en plus élevées [3].

Le but de ce chapitre est de fournir certains critères pour nous aider à choisir les composants les plus importants, ainsi que les calculs permettant leurs dimensionnements.

Les informations techniques contenues dans ce chapitre sont destinées essentiellement à aider le concepteur à les intégrer dans la réalisation technique du projet. Pour ces raisons il est important de rappeler que ceci n'a pas pour but de guider le concepteur, mais bien de lui permettre d'ajouter un complément au processus de conception afin de rendre l'exploitation des convoyeurs de plus en plus sécurisés. Le choix du système optimal du transport, de sa conception et de sa rationalisation est tributaire d'une connaissance parfaite des caractéristiques de la construction et des forces qui s'exercent sur tous les composants du système [3].

Les principaux facteurs qui déterminent le dimensionnement d'un convoyeur à bande sont :

- La capacité volumétrique nécessaire de la bande.
- Le type du produit à transporter et ses caractéristiques
- Le parcours et le profil du convoyeur.

Ces critères utilisés pour le calcul de la vitesse, de la largeur de la bande, du type et de la disposition des rouleaux des supports et le dimensionnement des tambours.

I.2 Types et configurations des convoyeurs à bande

En choisissant un convoyeur, il faut tenir compte des facteurs suivants :

- L'inclinaison du convoyeur
- La densité des matériaux

- La granulométrie du produit à transporter
- Le coefficient de frottement entre le matériau et le revêtement supérieur de la bande
- Les conditions environnementales (humidité, température et autres...)

Plusieurs types et profils des convoyeurs à bande sont été conçus tel que ;

- convoyeur à bande avec bords ondulés et tasseaux ;
- convoyeur à bande à double inflexion ;
- convoyeur à bande à chevrons ;
- convoyeur à bande à forte inclinaison ;
- convoyeur à bande plate ;
- convoyeur à bande à cabots pour éliminer l'émission des poussières.

la figure (I.1) illustre les principaux types des convoyeurs à bande



a)convoyeur avec bords ondulés et tasseaux

b) convoyeur à bande à double inflexion

c) convoyeur à bande à chevrons



d)convoyeur à bande à forte inclinaison

e) convoyeur à bande plate

f) convoyeur à bande à cabots

Figure I.1 Type et configuration des convoyeurs à bande [12]

I.3 Caractéristiques techniques d'un convoyeur à bande

Le convoyeur à bande est caractérisé par la puissance de son moteur d'entraînement, environ de 95 % de cette puissance est transformée en tension effective sur la bande.

Les deux facteurs, puissance du moteur et tension sur la bande sont d'une importance capitale pour le bon fonctionnement du convoyeur et le contrôle de la charge. Si la puissance et la tension ne sont pas correctement synchronisées, les matériaux peuvent se déverser et auront à la fois une incidence sur la durée de vie de la bande et sur les autres éléments du convoyeur comme il peut avoir des répercussions sur la sécurité de l'ensemble[6].

La puissance du moteur permet de :

- Vaincre la résistance attribuable au passage de la charge sur les rouleaux porteurs.
- Déplacer la charge en montée ou en descente.
- Accélérer le matériau à la vitesse de la bande au point de chargement.
- Accélérer ou de décélérer la charge et les parties en mouvement, même dans les conditions les plus sévères (matériaux et courroie gelés) au moment du démarrage.

La norme ISO/DP9856 obéit à une puissance d'entraînement déterminé par la formule suivante :

$$P = \frac{F_u \cdot V}{100 \cdot \eta} [\text{kw}] \quad (\text{I. 1})$$

Où

F_u : Effort tangentiel total

V : La vitesse de la bande

η : Le rendement de système du convoyeur

Une puissance correctement calculée permet de limiter les tensions sur la bande au strict minimum et de faire fonctionner le convoyeur dans toutes les conditions environnementales prévues [7].

Un bon régime transitoire (accélération et décélération) réduit les tensions sur la bande au démarrage et au freinage.

Parmi les autres systèmes de transport, on cite le transport par camion, et par comparaison avec le convoyeur à bande qui présente les avantages suivants par rapport à celui par camion :

- Réduction des effectifs.
- Réduction de la consommation d'énergie.

- Meilleure maintenance.
- discontinuité du produit.
- Réduction des risques d'accidents.
- Réduction des coûts d'exploitation.

Selon les charges à transporter, pour les grands convoyeurs à bande on réalise une économie de 40 à 60 % par rapport au transport routier [8].

I.4 Composants et leurs dénominations et dimensions

La figure(I.2) indique les principaux éléments d'un convoyeur à bande.

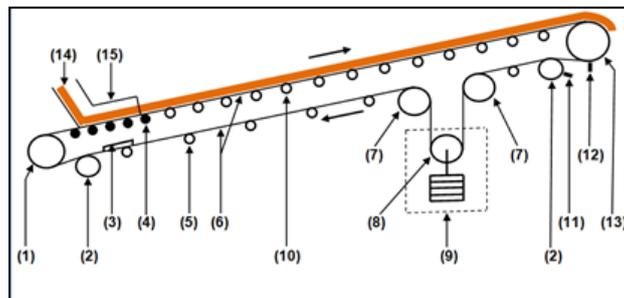


Figure I.2 principaux éléments d'un convoyeur à bande [12]

- (1) Tambour de renvoi
- (2) Poulie souple (en tête et en queue)
- (3) Nettoyeur de courroie interne (racleur de courroie interne)
- (4) Poulies à choc (rouleaux à impact)
- (5) Retour de rouleaux (rouleaux de renvoi)
- (6) Courroie
- (7) Poulies de contrainte
- (8) Poulie releveuse
- (9) Tendeur contre poids
- (10) les rouleaux du support (rouleaux porteurs)
- (11) Nettoyeur de poulie (racleur de poulie)
- (12) Nettoyeur de courroie externe (racleur de courroie externe)
- (13) La poulie d'entraînement
- (14) Matériaux
- (15) Trémie

I.4.1 La bande

Le principe de fonctionnement est de transporter le matériau de la queue jusqu'à la tête du convoyeur, la bande est sans doute la partie la plus importante du convoyeur, Il faut donc la choisir avec la plus grande attention, en étudiant d'abord les ressources nécessaires pour le choix de la bande tel que le type de matériau convoyé ,capacité volumétrique de la bande, vitesse de la bande, l'angle d'inclinaison du convoyeur, la puissance et la tension maximale de moteur et l'environnement de travail,...etc. [9].

I.4.1.1 Types de la bande transporteuse

Il existe deux types des bandes transporteuse : les bandes continues et les bandes discontinues.

Les bandes continues sont composées des morceaux des bandes mesurant entre 100 à 300m assemblés pour former une bande de plusieurs kilomètres de longueur.

Les bandes discontinues sont composées d'éléments de faible longueur (quelques cm) assemblés telle une chaîne, la longueur de la bande est proportionnelle au nombre de maillon qui la composent il dépend exclusivement de son utilisation[7].

La bande est un élément complexe, elle est composée de deux parties :

- Partie textile qui transmet les efforts et celle qui est en contact avec l'extérieur.
- Partie souple en PVC ou en un composite PVC-caoutchouc qui sert à protéger le renfort textile des chocs ainsi que de l'abrasion produits par la marchandise transportée comme l'illustre dans la figure (I.3).

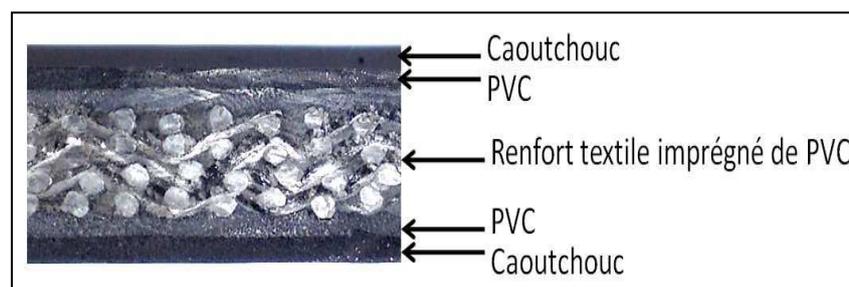


Figure I.3 Coupe transversale de la bande transporteuse [7]

I.4.1.2 Capacité volumétrique de la bande

La capacité volumétrique de la bande se définit comme le volume maximal de matériaux donnés que la bande peut transporter par unité de temps en régime continu, avec une fiabilité donnée et dans les conditions de fonctionnement données, sans l'émission de

pour éviter de causer des déversements ou des débordements des matériaux, donc la capacité volumétrique de la bande est estimée par :

- Profil de la bande
- Vitesse de la bande
- Largeur de la bande
- L'inclinaison du convoyeur

D'après la norme ISO/DP9856 on obtient la capacité volumétrique de la bande à l'aide de la formule suivante :

$$I_m = \frac{I_v}{q_s} \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad (\text{I.2})$$

Où :

I_v : Capacité de charge de la bande [t/h]

q_s : Masse volumique du produit [t/m³]

La valeur du volume transporté I_{VT} peut être facilement calculée à l'aide de la formule suivante :

$$I_{VT} = \frac{I_m}{V} \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad (\text{I.3})$$

On peut déterminer à l'aide du tableau I.1 si la largeur de la bande choisie correspond à la capacité volumétrique I_m , en fonction de la conception des stations-supports, de l'inclinaison des rouleaux, de l'angle de talutage du produit et de la vitesse de la bande avec stations-supports en auge à 3 rouleaux [11], [12], [13]

Tableau I.1 Débit volumétrique avec stations supports en auge à 3 rouleaux [4]

Largeur de la bande [mm]	Débit volumique théorique I_{vt} [m ³ /h]					
	Angle de talutage [°]	Angle d'inclinaison des rouleaux				
		$\lambda=20$	$\lambda=25$	$\lambda=30$	$\lambda=35$	$\lambda=45$
1400	5°	465.8	540.7	606.9	661.3	753.8
	10°	574.9	644.7	706.3	753.4	843.1
	20°	804.9	867.6	918.7	957.9	1006.9
	25°	906.4	985.3	1031.4	1063.4	1100.1
1600	5°	616.6	716.0	803.8	875.5	997.5
	10°	760.6	853.2	934.5	994.2	1102.6
	20°	1063.8	1146.9	1214.2	1266.4	1330.2
	25°	1198.0	1302.1	1363.3	1405.4	1452.9
1800	5°	788.7	915.4	1027.8	1119.6	1274.7
	10°	972.3	1090.8	1194.4	1272.4	1409.0
	20°	1353.2	1465.2	1551.2	1617.8	1698.8
	25°	1530.7	1663.2	1740.0	1794.9	1854.7

Angle de talutage

L'angle de talutage est l'angle que forme l'horizontale avec la surface du produit lors de son transport sur une bande en mouvement, cet angle est généralement compris entre 5° et 15° (Jusqu'à 20° pour certains produits) et est bien inférieur à l'angle d'éboulement comme le montre la figure (I.4).

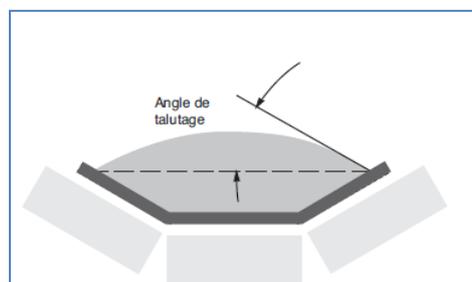


Figure I.4 Angle de talutage [12]

L'angle d'éboulement

L'angle d'éboulement d'un produit, que l'on appelle également « angle de frottement naturelle », est l'angle que la ligne de pente de produit, mis en tas librement sur une surface plate, forme avec l'horizontale comme le montre la figure (I.5).

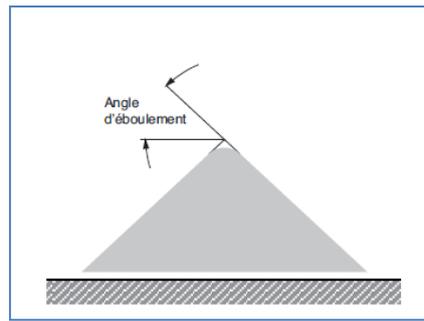


Figure I.5 Angle d'éboulement [12]

I.4.1.3 Profils de la bande

Est définie comme étant la combinaison du type de la bande (plate, en auge, avec un bord de contenance, en sandwich, ronde, carrée, etc.) et des caractéristiques de sa face externe (lisse, nervurée, à tasseaux, à godets, etc.).

De ce fait, le profil de la bande à des répercussions sur la conception des dispositifs mécaniques requis pour assurer le bon fonctionnement du convoyeur (grattoirs, rouleaux, tambours, etc.) et des incidences sur la sécurité au cours de l'utilisation et de l'entretien du convoyeur [11].

I.4.1.4 Vitesse de la bande

La vitesse maximale d'un convoyeur à bande a atteint des limites qui étaient inimaginables il y a quelques années, ces vitesses très élevées ont permis d'augmenter considérablement les volumes transportés.

Les caractéristiques physiques du produit à manutentionner sont l'élément déterminant pour le calcul de la vitesse de la bande car les produits légers, tels que les céréales, la poussière ou les fines de minerais, permettent d'utiliser des vitesses élevées. Par contre, une granulométrie, une abrasivité ou une masse volumique plus importantes nécessitent de réduire la vitesse de la bande transporteuse [12].

Le tableau I.2 indique les vitesses maximales recommandées, compte tenu des caractéristiques physiques et de la granulométrie du produit transporté, ainsi que de la largeur de la bande utilisée [11].

Tableau I.2 Vitesses maximales conseillées [4]

Granulométrie Dimensions max [mm]		Bande				
Homogène	mélangé	Largeur min [mm]	Vitesse max [m/s]			
			A	B	C	D
50	100	400	2.5	2.3	2	1.65
75	150	500				
125	200	650	3	2.75	2.38	2
170	300	800	3.5	3.2	2.75	2.35
250	400	1000	4	3.65	3.15	2.65
350	500	1200				
400	600	1400	4.5	4	3.5	3
450	650	1600				
500	700	1800	5	4.5	3.5	3
550	750	2000				
600	800	2200	6	5	4.5	4

A : Produit léger glissant, non abrasif

B : Produit non abrasif, granulométrie moyenne

C : Produit moyennement abrasif et lourd

D : Produit abrasif, lourd et présentant des arêtesaigües

Une augmentation de la vitesse de la bande entraîne une augmentation proportionnelle du volume des matériaux transportés pour cet effet la vitesse doit être adaptée au type de matériaux transportés car la variation de la vitesse elle a un effet positif et négatif sur le fonctionnement et le comportement du convoyeur à bande.

❖ Vitesse élevée

Les effets positifs sont :

- Permet de transporter plus de matériau
- Lorsque les facteurs liés à cette vitesse élevée sont pris en compte, cela réduit aussi les risques de déversement.

Les effets négatifs sont :

- Peut entraîner l'émission de poussière, de déversement et la projection des charges isolées.
- Risque de choc et de coincement avec les charges isolées ou les agrégats.
- Si le convoyeur est en montée, la vitesse a pour effet de faire glisser ou chuter lesmatériaux (surtout les agrégats et les matériaux sphériques) vers l'arrière [10].

❖ Vitesse faible

Les effets positifs sont :

- Limite l'émission de poussière ainsi que les déversements.

Les effets négatifs sont :

- Si la vitesse du convoyeur est trop faible par rapport au débit de la trémie d'alimentation, il y aura surcharge du convoyeur ainsi que des déversements.

I.4.1.5 Largeur de la bande

Une augmentation de la largeur de la bande augmente significativement le volume de matériau transporté car une bande de bonne largeur permettra la ségrégation des matériaux fins et le contrôle du mouvement des agrégats, l'utilisation d'une bande bien dimensionnée permet d'éviter les déversements et la chute d'agrégats [7].

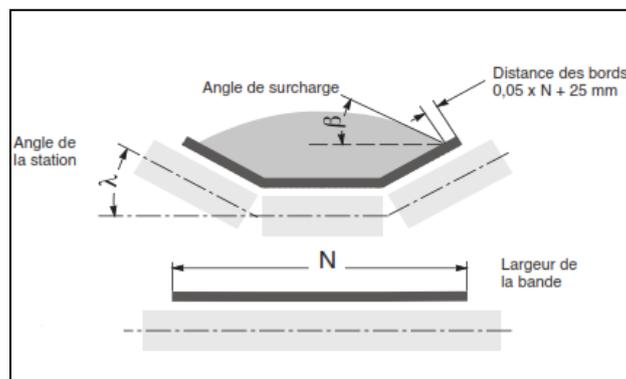


Figure I.6 La largeur de la bande [1]

La largeur de la bande avec le plus grand angle correspond à une augmentation du débit volumique. Cette largeur est essentiellement déterminée en fonction de la quantité de produit transporté et en fonction de sa charge de la rupture et de l'inclinaison des rouleaux du support, comme il est indiqué dans la figure (I.6).

D'après la norme ISO/DP9856 la largeur optimale recommandée d'une bande transporteuse est indiqué dans le tableau I.3.

Tableau I.3 Largeur minimale de la bande [12]

Largeur minimale de la bande en fonction de sa charge de rupture et de l'inclinaison des rouleaux			
Charge de rupture [N/mm]	Largeur de la bande [mm]		
	Inclinaison des rouleaux [°]		
	$\lambda=20/25^\circ$	$\lambda=30/35^\circ$	$\lambda=45^\circ$
400	400	400	450
500	450	450	500
630	500	500	600
800	500	600	650
1000	600	650	800
1250	600	800	1000
1600	600	800	1000

I.4.1.6 Les tensions sur les brins de la bande

Etant donné un convoyeur à bande motorisé, les tensions au niveau de la bande doivent être prises en considération et il est nécessaire de les vérifier, figure (I.7)

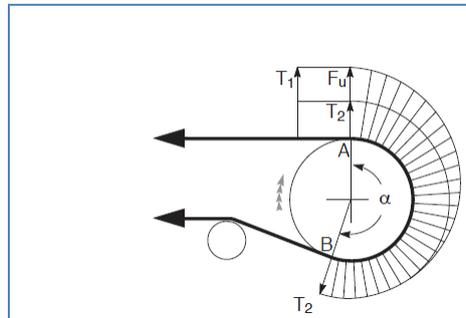


Figure I.7 Tensions exercées sur la bande au niveau du tambour de commande [5]

T₁ : C'est la tension sur le brin supérieur de la bande due à l'entraînement de cette dernière par le tambour de commande [14].

T₂ : C'est la tension sur le brin inférieur elle est uniforme sur la surface de la bande en contact avec le tambour de commande comme l'illustre la figure (I.7)

L'effort tangentiel total F_u sur la circonférence du tambour correspond à la différence entre les tensions T₁ (coté d'entrée) et T₂ (coté sortie)

$$F_u = T_1 - T_2 \tag{I.4}$$

En se déplaçant du point A au point B sur la figure (I.7) la tension de la bande passe exponentiellement d'une valeur T₁ à une valeur T₂

La relation entre T₁ et T₂ peut être exprimée de la manière suivante :

$$\frac{T_1}{T_2} \leq e^{f\alpha} \tag{I.5}$$

fα : Coefficient de frottement entre la bande et le tambour en fonction de l'angle d'enroulement

e : base logarithmique naturelle qui est égale à 2,718

Le signe (≤) définit l'état limite d'adhérence de la bande

Si le rapport $\frac{T_1}{T_2} > e^{f\alpha}$, la bande va glisser sur le tambour d'entraînement et le mouvement ne peut pas être transmis [12], [14].

A partir de la formule ci-dessus on peut obtenir la valeur de tension sur le brin supérieur de la bande:

$$T_1 = F_U + T_2 \quad (I.6)$$

I.4.2 Les tambours

Selon leur emplacement sur le convoyeur, les tambours doivent résister aux forces exercées à la fois par la tension de la bande et par le produit transporté et pour un maximum d'efficacité, tant pour le remplacement d'un tambour que pour une nouvelle installation, les données suivantes permettent de déterminer les dimensions et les caractéristiques de la construction parce qu'ils sont indispensables pour le choix d'un tambour [12].

Les principales données nécessaires à la conception d'un tambour sont les suivantes :

- Largeur de la bande
- Diamètre du tambour en fonction du type et des caractéristiques de la bande
- Mode de fixation de l'axe au tambour (bague de verrouillage, clavette, soudage)
- Emplacement du tambour (tambour de commande, de renvoi ou de contrainte) comme le montre dans la figure (I.8)
- Angle d'enroulement de la bande sur le tambour d'entraînement α
- Tensions de la bande T_1, T_2

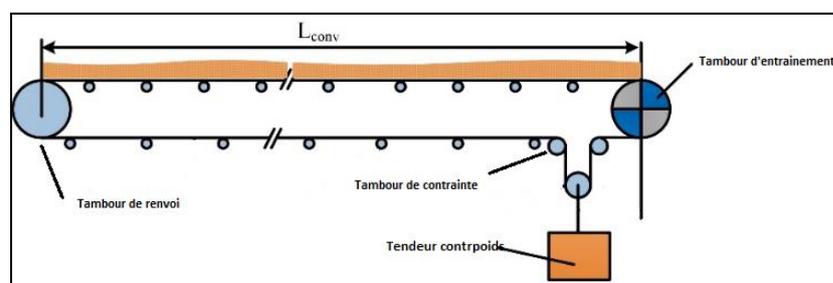


Figure I.8 Emplacement des tambours [16]

I.4.2.1 Tambour d'entraînement

Entraîner la bande ou l'amener à changer de direction, les tambours peuvent être recouverts d'une garniture afin d'augmenter le coefficient de frottement entre la bande et le tambour, dans le cas des convoyeurs nécessitant des puissances plus élevées, l'entraînement est assuré par deux manières :

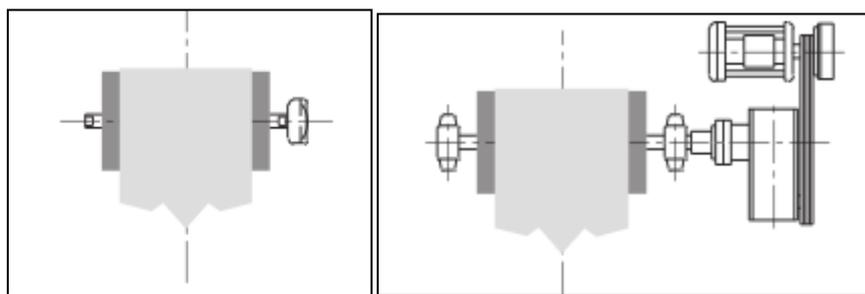
- **Entraînement traditionnelle**

Au niveau du tambour d'entraînement par l'utilisation d'un moteur électrique, une boîte d'engrenages, un tambour, des protecteurs, des éléments de transmission et accessoires, etc.

- **Entraînement par un tambour moteur intégré**

Le tambour moteur est de plus en plus utilisé de nos jours pour l'entraînement des convoyeurs à bande, en raison de ses caractéristiques et de sa compacité, comme il prend un minimum de place et facile à installer.

Le moteur a un indice de protection, toutes les pièces en mouvement sont situées à l'intérieur du tambour, ce qui implique une maintenance peu importante et peu fréquente la figure (I.9) montrée une comparaison de l'espace nécessaire pour ces deux systèmes d'entraînement [13].



a) *Entraînement par tambour moteur*

b) *Entraînement traditionnel*

Figure I.9 Comparaison entre les deux systèmes d'entraînement [3]

Le système d'entraînement est l'un des éléments les plus importants dans un système de convoyeur à bande ; il affecte à la performance, la capacité et l'économie d'énergie du convoyeur [15].

I.4.2.2 Tambour de renvoi

Il permet le renvoi la bande vers le brin porteur, parfois il peut aussi être un tambour d'entraînement, son diamètre est plus petit que le tambour d'entraînement.

I.4.2.3 Tambours de contrainte

Ils sont installés en aval ou en amont par rapport au tambour d'entraînement leurs rôles est de ramener ou maintenir la bande en ligne avec le brin de retour ou créer l'angle d'enroulement désiré autour de ce dernier, et d'une manière générale, ils sont utilisés dans tous les cas où il est nécessaire de dévier la bande au niveau des dispositifs de tension à contrepoids [14].

I.4.2.4 Diamètres des tambours

Un diamètre correct de tambour d'entraînement minimise les contraintes dans la bandeau niveau des jonctions, un grand angle d'enroulement autour du tambour moteur permet de réduire la tension globale dans la bande, ce qui permet la réduction du diamètre des tambours de contrainte.

Le dimensionnement du diamètre d'un tambour d'entraînement dépend étroitement du type de la bande utilisée.

Le tableau I.4 indique les diamètres minimaux recommandés par rapport au type de la bande utilisée, pour éviter son endommagement comme la séparation au niveau des jonctions ou déchirure de l'armature [12].

Tableau I.4 Diamètres minimaux recommandés pour les tambours [4]

Diamètres minimaux recommandés pour les tambours						
Charge de rupture de la bande [N/mm]	Bande à armature textile			Bande à armature métallique		
	tambour commande [mm]	tambour renvoi [mm]	tambour contrainte [mm]	tambour commande [mm]	tambour renvoi [mm]	tambour contrainte [mm]
200	200	160	125	–	–	–
250	250	200	160	–	–	–
315	315	250	200	–	–	–
400	400	315	250	–	–	–
500	500	400	315	–	–	–
630	630	500	400	–	–	–
800	800	630	500	630	500	315
1000	1000	800	630	630	500	315

I.4.3 Les rouleaux de supports

Ce sont les composants les plus importants du convoyeur et ils représentent une part considérable de l'investissement total, comme ils réduisent la résistance au mouvement de la bande chargée et la soutiennent en produisant un mouvement doux et sans heurt.

On distingue deux types de rouleaux de supports sur un convoyeur à bande :

- Les rouleaux de supports supérieurs
- Les rouleaux de supports inférieurs

I.4.3.1 Les rouleaux de supports supérieurs

Ils soutiennent la bande et tournent librement et facilement sous la charge, certains rouleaux porteurs peuvent aussi servir à amortir les impacts, à aligner la bande, à la former en auge ou à en changer la direction, sur la plupart des convoyeurs à bande, les rouleaux du support porteurs ont une configuration en auge pour que la bande puisse transporter maximum de produit.

I.4.3.2 Les rouleaux de supports inférieurs

Les rouleaux de supports inférieurs qui soutiennent la bande non chargée à son retour, peuvent comporter un seul rouleau sur toute la largeur ou bien deux rouleaux formant un "V" et inclinés à 10° .

I.4.3.3 Ecartement des rouleaux de supports

L'écartement des rouleaux de supports est la distance qui sépare deux rouleaux porteurs supérieurs ou bien celles qui portent le brin inférieur de la bande transporteuse, comme l'indique la figure (I.10) elles sont respectivement a_0 , a_u . On définit l'écartement des rouleaux de supports selon la largeur de la bande et la masse volumique du produit à transporter.

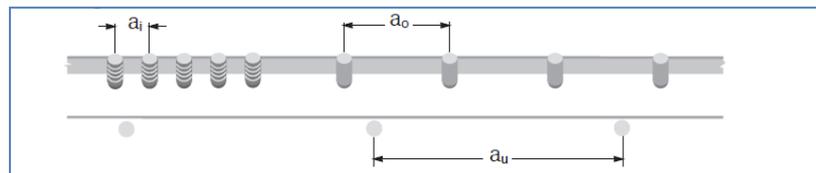


Figure I.10 Ecartement des rouleaux des supports [14]

La distance entre deux rouleaux de supports la plus couramment utilisée pour le brin supérieur d'un convoyeur à bande est **1** mètre, alors que pour le brin inférieur les rouleaux sont normalement espacés de **3** mètres [12].

Le tableau I.5 indique les différentes valeurs de l'écartement maximal préconisé selon la largeur de la bande et la masse volumique du produit transporté

Tableau I.5 Ecartement entre les rouleaux des supports [4]

Largeur de la bande [mm]	Ecartement maximal préconisé entre les stations [m]			
	Ecartement des rouleaux supérieurs Selon la masse volumique du produit transporté [t/m ³]			Rouleaux inférieures [m]
	< 1.2 t/m ³	De 1.2 à 2.0 t/m ³	> 1.2 t/m ³	
800	1.5	1.35	1.25	3.0
1000	1.35	1.20	1.10	3.0
1200 1400 1600 1800	1.2	1.00	0.80	3.0

L'écartement des rouleaux supérieures situés au niveau du point de chargement a_i est réduit par rapport à l'écartement des rouleaux supérieures a_0 de moitié ou plus pour éviter toute incurvation excessive de la bande transporteuse et son débordement.

D'après le tableau I.5 si on trouve que la largeur de la bande est de : 1600 mm, on a Ecartement des rouleaux supérieures $a_0 = 1,20$ m

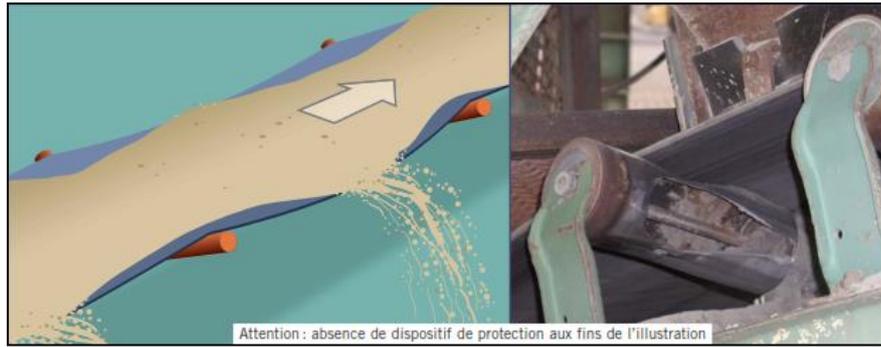
Ecartement des rouleaux inférieures $a_u = 3,0$ m

On aura donc :

$$a_i = \frac{a_0}{3} = 0,4m \quad (I.7)$$

Le fléchissement de la bande entre deux rouleaux porteurs ne doit pas dépasser 2% de la distance qui les sépare, un fléchissement plus important entraîne un déversement du produit pendant le chargement et favorise des forces de frottement excessives pendant le déplacement de la bande en raison de la manipulation du produit transporté comme le montre la figure (I.11).

Il en résulte non seulement une augmentation de la puissance consommée, mais également des efforts exercés sur les rouleaux, et d'une manière générale une usure prématurée de la surface de la bande [11], [12].



(A)

(B)

Figure I.11 Les rouleaux des supports [10]

(A) Perte de la forme en auge lorsque l'espacement entre les rouleaux supports est très grand

(B) Rouleaux support défectueux

I.4.4 Dispositifs de tension

Ils fournissent un effort nécessaire pour maintenir la bande en contact avec le tambour d'entraînement, ils peuvent être ; à vis, à contrepoids ou avec un treuil motorisé.

Le contrepoids applique un effort de tension constant à la bande, quelles que soient les conditions, son poids est calculé en fonction des limites minimales nécessaires pour assurer la tension correcte de la bande et éviter toute surtension.

Le mouvement du dispositif de tension à contrepoids est calculé d'après l'élasticité de la bande pendant les diverses phases de fonctionnement du convoyeur.

I.4.5 Système de chargement

Il sert pour le guidage et le contrôle du débit des matériaux sur la bande, il peut prendre plusieurs formes : trémie, glissière, chargeur automatique, poussoirs, etc. La trémie est le modèle le plus utilisé dans l'industrie, les mines et les carrières.

La trémie (entonnoir) est conçue pour faciliter le chargement et le glissement du produit en absorbant les chocs de la charge et en évitant les colmatages et l'endommagement de la bande, elle permet un chargement immédiat du produit et résout les problèmes d'accumulation.

I.4.6 Dispositifs de nettoyage

L'enlèvement et le raclage des matériaux qui collent aux deux faces de la bande sur le tambour, il prend souvent la forme d'un grattoir ou d'une brosse, le système de

nettoyage de la bande doit faire l'objet d'une attention toute particulière de manière à réduire la fréquence des opérations de maintenance et permet au convoyeur d'atteindre un maximum de productivité notamment lorsque la bande transporte des produits humides ou collants.

I.5 Propriétés physiques des produits transportés

Le tableau I.6 indique les propriétés physiques des produits qu'il convient de prendre en compte lors de l'étude d'un transporteur à bande [12], [15].

Tableau I.6 Propriétés physiques des produits transportés [12]

Propriétés physiques des produits transportés		
Type	Masse volumétriquemoyenne [t/m ³]	Angle d'écoulement [°]
Alumine	0,80-1,04	22°
Calcaire broyé	1.36-1.44	35°
Gravier	1.44-1.60	40°
Gypse, morceaux de 13 mm à 80 mm	1.12-1.28	30°
Minéral de fer	1.60-3.20	35°
Minéral de plomb	3.20-4.32	30°
Plâtre, poussière	0.96-1.12	42°
Sable sec	1.44-1.76	35°
Phosphate	0.96	40°
Sable	1.76-2.08	45°
Sel	1.12-1.28	25°
Sucre en poudre	0.80-0.96	30°

I.6 Conclusion

L'objectif de ce chapitre est de déterminer les dimensions des principaux composants du convoyeur à bande, en tenant compte de l'encombrement disponible et des autres contraintes exigées par l'entreprise.

Dans ce chapitre nous avons présenté les principaux composants d'un convoyeur à bande et les différentes étapes de calcul pour sa conception.

La détermination de la puissance est exigée ainsi que le dimensionnement des différents organes de transmission, ceci en partant du débit massique, la masse volumique du produit à transporter et de la vitesse de déplacement de la bande.

L'étude de la conception nous a permis d'avoir une idée générale sur les convoyeurs existants sur le marché mondial, ainsi que les caractéristiques de chaque type de convoyeur, elle nous a orientés pour le choix de type de convoyeur à bande qui répond au cahier de charge de chaque fonction demandée par l'utilisateur et qui s'adapte avec son environnement.

Chapitre II

Contrôle de la vitesse des convoyeurs à bande

II.1 Introduction

Les convoyeurs à bande ont été largement utilisés dans les systèmes de manutention et de transport de matériaux solides, l'utilisation intensive du convoyeur à bande entraîne une grande consommation d'électricité [1].

En tenant compte des exigences économiques et écologiques, plusieurs solutions de réduction de puissance ont été proposées, selon la norme DIN 22101, une certaine réduction de la consommation d'énergie peut être obtenue en ajustant la vitesse du convoyeur en fonction du débit de matériau [5], [6].

La technique d'ajustement de la vitesse du convoyeur dans le but de réaliser des économies d'énergie est étroitement liée au contrôle de la vitesse [8], [11].

Actuellement les recherches relatives au contrôle de la vitesse dénotent une relation linéaire avec la capacité de transport, ainsi un système de contrôle de la vitesse nécessite l'utilisation d'un variateur de vitesse pour régler la vitesse de fonctionnement du convoyeur afin qu'elle corresponde au débit de la matière observé par un capteur de débit.

Après avoir satisfait à ces conditions préalables (variateur de la vitesse, débit de matériau), le contrôle de la vitesse devrait être appliqué pour réduire la consommation d'énergie des convoyeurs à bande [14], [15].

II.2 Convoyeurs à bande typique

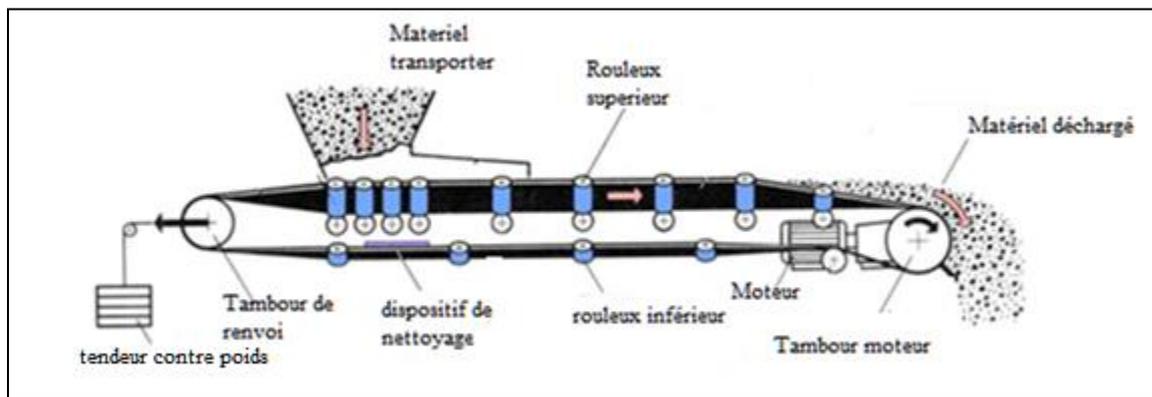


Figure II.1 Composants et assemblage du convoyeur à bande typique [10]

Le tambour d'entraînement est situé en tête du convoyeur à bande, et sachant que les longueurs de convoyeur à bande sont parfois de l'ordre de quelques mètres à plusieurs dizaines de kilomètres il est nécessaire d'installer des entraînements intermédiaires afin de maintenir la tension requise de la bande comme l'illustre dans la figure (II.1)

Le long de la voie de transport, la bande est soutenue par un grand nombre de rouleaux de supports des brins supérieurs et inférieurs ainsi que le tambour de renvoi, entre les stations voisines la bande mobile est affaissée en raison de son propre poids et de la charge du matériau, pour réduire le taux d'affaissement une pré-tension importante est produite par un tendeur à contre poids [1].

Le tendeur à contre poids, donne une tension constante à la bande qui est indépendante de la charge de la bande, la tension de la bande peut être obtenue par un système de tension mécanique [2].

L'étude actuelle concerne beaucoup plus les convoyeurs à bande enroulés car ils sont les plus utilisés dans les applications industrielles, où il est conçu par un brin chargé qui se compose de trois rouleaux de même longueur et les mêmes diamètres et de brin vide quant à lui est composée de deux rouleaux de support sous la forme « V », comme le montre dans la figure (II.2)

D'après la norme DIN-22101, la capacité nominale de convoyeur Q_{nom} est :

$$Q_{nom} = 3.6. A_{nom} \cdot \rho_s \cdot V_{nom} \quad (II.1)$$

Où

A_{nom} : Section nominale d'un convoyeur à bande

ρ_s : Densité du matériau solide en vrac transporté

V_{nom} : Vitesse nominale du convoyeur à bande

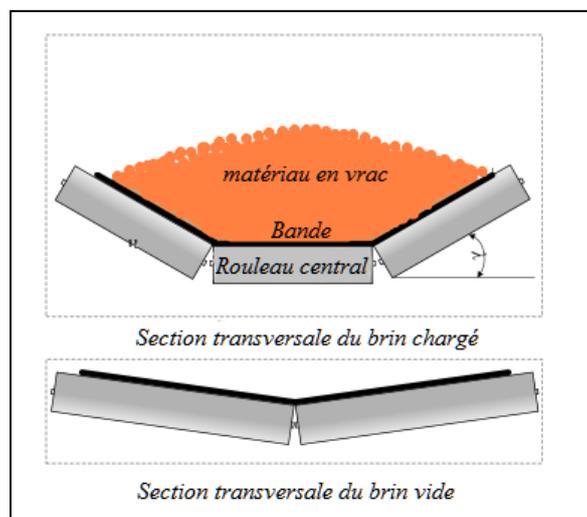


Figure II.2 Section transversale du brin vide et chargé du convoyeur à bande [1]

II.3 Solutions pour réduire la consommation d'énergie des convoyeurs à bande

En raison de leurs avantages inhérents, tels que leur grande capacité et leur faible main-d'œuvre, les transporteurs à courroie jouent un rôle important dans la manutention et le transport des solides en vrac. Selon [16], il y aurait plus de 2,5 millions de convoyeurs en exploitation dans le monde. Compte tenu de leur utilisation intensive, ceci implique une grande consommation d'énergie.

Les convoyeurs à bande consomment de 50% à 70% de la demande totale d'électricité dans un terminal de vrac sec et à elle seule l'Afrique du Sud réserve environ 10% de sa consommation énergétique globale pour les convoyeurs à bande [17].

Compte tenu des défis économiques et écologiques actuels des efforts considérables sont déployés pour une réduction significative de la consommation énergétique des convoyeurs à bande dans le but de minimiser l'empreinte carbone.

Au cours des dernières décennies, plusieurs améliorations ont été proposées au niveau des constructions des convoyeurs à bande afin de minimiser les pertes d'énergie, ces différents nouveaux concepts de construction peuvent être classés en quatre méthodes [19] :

1. Méthodes d'utilisation des composants économiques

- Bandes transporteuses à faible perte
 - Utilisation une bande en caoutchouc à faible perte pour ne pas perdu la surface inférieur de la bande
 - Une bande du poids légère
- Des stations supports économes en énergie
 - Rouleaux à faibleperte
 - Nouvelle conception pour les stations lentes
- Systèmes d'entraînement efficaces en énergie
 - Unités d'entraînement efficaces, telles que convertisseurs de fréquence, boîtes de vitesses et moteurs

2. Méthodes d'optimisation de la conception

- Optimiser l'itinéraire des convoyeurs
- Réduire le nombre de points de chargements (s'assurer que la répartition de la charge sur le long de convoyeur soit uniforme)

3. Méthodes de récupération d'énergie

- Réparation des générateurs de charge supplémentaire (défaillance des rouleaux et autres par une surveillance efficace)

4. Méthodes d'optimisation de l'opération d'entraînement

- Contrôle de l'état de fonctionnement des moteurs
- Adapter la vitesse du convoyeur

Dans le cas de l'installation d'un nouveau convoyeur à bande, les deux premières méthodes sont appliquées efficacement pour réduire la consommation d'énergie.

La troisième méthode, participe efficacement à la réduction de l'énergie de convoyeur elle est écologiquement prometteuse et techniquement possible [20].

Quant à la quatrième méthode elle est valable à la fois pour les installations existantes et ceux en projet et implique des investissements supplémentaires limités.

Ce chapitre est basé sur la méthode d'optimisation de l'opération d'entraînement, avec en particulier l'ajustement de la vitesse du convoyeur.

D'après l'équation II.1, la capacité nominale du convoyeur à bande dépend de la section nominale du débit du convoyeur, de la masse volumique du matériau, et de la vitesse nominale du convoyeur [17].

Normalement, le débit de la matière réelle est généralement inférieur à la capacité nominale des convoyeurs à bande pour éviter la surcharge de la bande aux points de chargement.

Lorsque le convoyeur à bande tourne à vitesse nominale, la bande est partiellement remplie, le réglage de la vitesse de la bande est synchronisé avec la vitesse du convoyeur ceci permet de faire des économies d'énergie considérables sur les convoyeurs à bande, cette technique est définie comme un contrôle de la vitesse.

II.4 Régimes de fonctionnement des convoyeurs à bande

Le convoyeur à bande fonctionne généralement à une vitesse définie, dans le cas d'un changement considérable de la vitesse d'alimentation du matériau, le convoyeur à bande doit être accélérer ou ralentir pour correspondre au débit réel du matériau.

On distingue deux types de régimes :

II.4.1 Le régime stationnaire

C'est le cas où la bande à l'arrêt, le cas où la bande tourne à une vitesse nominale et le cas où la bande tourne à une vitesse non nominale (la vitesse non nominale peut être inférieure ou supérieure à la vitesse nominale) voir la figure (II.3)

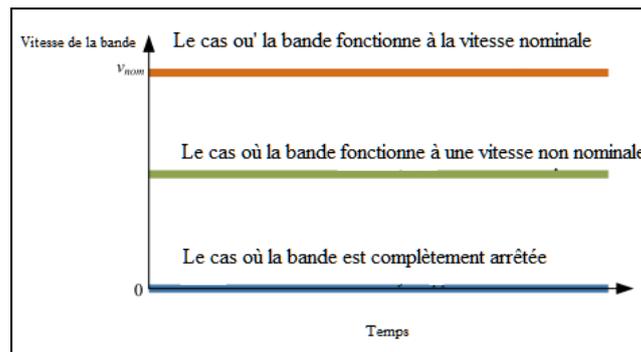


Figure II. 3 Les régimes stationnaires de convoyeur à bande [1]

II.4.2 Le régime transitoire

Est situées entre deux régimes stationnaires voisins il comprend à la fois les processus d'accélération et décélération comme le montre la figure (II.4)

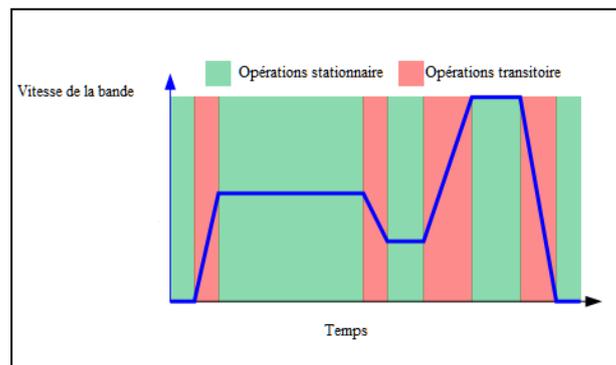


Figure II.4 Le régime transitoire du convoyeur à bande (cyclo gramme) [1]

II.5 Contrôle de la vitesse des convoyeurs à bande

Il se fait surtout pendant le régime transitoire pour effectuer des démarrages et des arrêts progressifs.

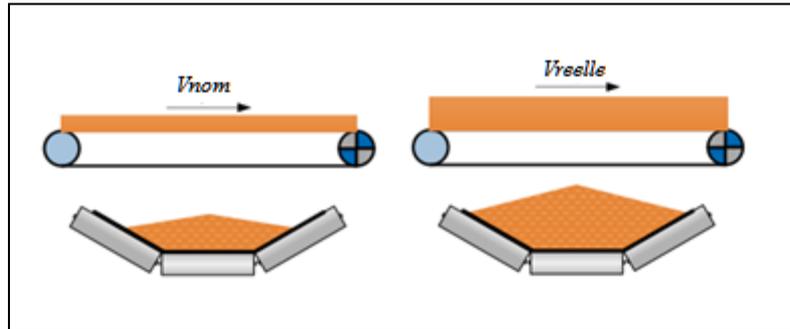
Plusieurs techniques ont été utilisées pour fournir un démarrage acceptable dans toutes les conditions d'exploitation du convoyeur et avec les différentes charges de la bande, parmi ces techniques nous avons le contrôle de la vitesse à fréquence variable, le contrôle de la vitesse à couplage hydraulique, et le contrôle de la vitesse à transmission mécanique variable, des techniques récentes sont utilisées actuellement pour atteindre un temps de freinage adapté, telles que l'utilisation des systèmes de freinage intelligents afin de prévoir un arrêt progressif [24], [25].

Le contrôle de la vitesse permet à la fois de minimiser et d'éliminer les secousses lors du freinage par l'ajustement de la vitesse du convoyeur en fonction du débit transporté, afin d'éviter la surcharge de la bande accompagné d'une réduction de la consommation d'énergie des convoyeurs à bande.

L'opération de réglage de la vitesse est définie comme une opération transitoire dans le régime de fonctionnement des convoyeurs à bande.

II.6 Principe du contrôle de la vitesse

Les convoyeurs à bande sont conçus pour résister au transport à une valeur maximale du débit, la capacité volumétrique maximale demandée est proportionnelle à la valeur de la vitesse nominale de la bande et la valeur de la section nominale du matériau transporté, comme le montre la figure (II.5).



(a) Vitesse nominale (b) Vitesse non nominale

Figure II.5 Principe du contrôle de la vitesse [45]

V_{nom} : Vitesse nominale

V_{reelle} : Vitesse réelle non nominale (inférieure à la vitesse nominale)

Le principe du contrôle de la vitesse ou le plus souvent le convoyeur tourne à une vitesse nominale, figure(II.5a) indique que si le débit du matériau est inférieur à la capacité de transport nominale le convoyeur à bande est rempli partiellement.

La réduction de la consommation d'énergie, passe par la réduction de la vitesse du convoyeur pour suivre le taux d'alimentation réel, comme le montre la figure (II.5b) où le taux de remplissage de la bande est considérablement amélioré grâce au contrôle de la vitesse.

En tenant compte de la section transversale autorisée du matériau sur la bande, la vitesse réelle du convoyeur V_{reelle} doit satisfaire à l'équation suivante :

$$V_{reelle} \geq \frac{Q_{reelle}}{Q_{nom}} V_{nom} = \frac{A_{reelle}}{A_{nom}} V_{nom} \quad (II.2)$$

Où

Q_{reelle} : Taux d'alimentation réel

Q_{nom} : Capacité nominale de convoyeur

$A_{\text{réelle}}$: Section transversale du matériau sur la bande lorsque le convoyeur tourne à une vitesse nominale.

En pratique et afin d'éviter le risque de surcharge du convoyeur, la vitesse de la bande doit être légèrement supérieure à la vitesse minimale demandée et la surface réelle de la section transversale du matériau sur le convoyeur à bande doit être supérieure jusqu'à 10% de la valeur nominale pendant une courte période de temps.

D'après la norme DIN- 22101 (Institut allemand de normalisation, 2015), la capacité du convoyeur est exprimée à base de 80% de l'utilisation de la section transversale de la bande [27], [28].

II.7 Conditions préalables du système de contrôle de vitesse

Le contrôle de la vitesse est conçu pour réduire la consommation d'énergie des convoyeurs à bande, pour se faire le contrôle de la vitesse est basé sur deux conditions préalables :

- a) Le système de contrôle de la vitesse.
- b) Le contrôle du débit du matériau.

Le système de contrôle de la vitesse est un système de commande moderne intégré par un variateur de vitesse ayant pour but le réglage la vitesse de la bande pour qu'il soit synchronisé avec le débit du matériau selon le signal donné par le capteur de débit.

II.7.1 Les variateurs de la vitesse

Ils sont des outils du système de contrôle de la vitesse, sont largement utilisés pour réaliser des démarrages et des arrêts progressifs des convoyeurs à bande, il existe deux types de variateurs de vitesse :

- Variateur de la vitesse mécanique
- Variateur de la vitesse électronique

II.7.1.1 .Variateur de la vitesse mécanique

Selon l'association de « Conveyor Equipment Manufacturers (2005) », les méthodes mécaniques les plus utilisées pour obtenir une vitesse variable sont les suivantes :

- *Variateur de vitesse à bande trapézoïdale*

La transmission du mouvement par une bande trapézoïdale est constituée d'une petite poulie 1 (d, R_d, W_d), une grande poulie 2 (D, R_D, W_D) avec un coefficient de frottement f_f et une vitesse linéaire V , voir la figure (II.6)

Où

$$V_1 = W_d \cdot R_d \longrightarrow V_2 = W_D \cdot R_D$$

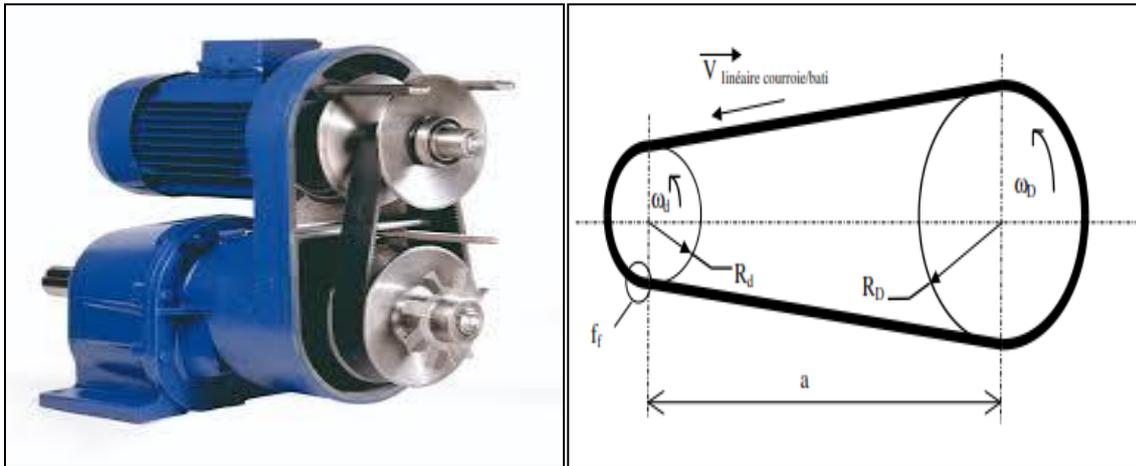
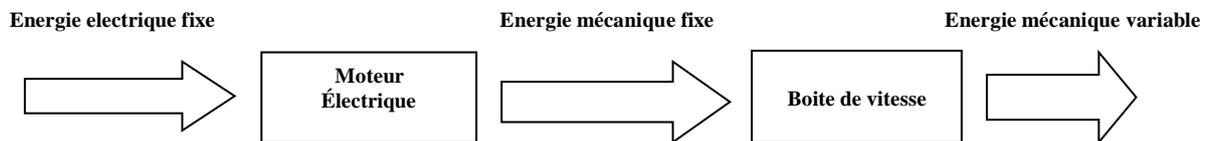


Figure II.6 Variateur de la vitesse à courroie trapézoïdale



- *Variateur de la vitesse à engrenage*

Les engrenages permettent de transmettre un mouvement de rotation suivant la dimension et le nombre de dent des engrenages, ils offrent la possibilité de réduire ou de multiplier les vitesses de rotation à l'entrée ou à la sortie de la machine, voir la figure (II.7)



Figure II.7 Variateur de vitesse à engrenage

Le rapport de la transmission de mouvement entre le nombre des dents de la roue menante $Z_{menante}$ et la roue menée $Z_{menée}$ est R :

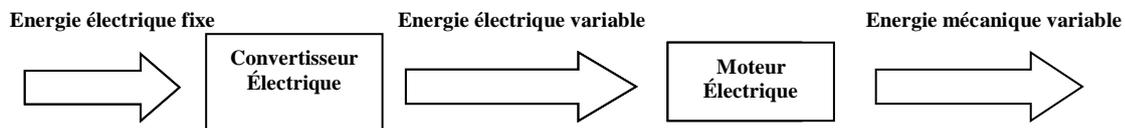
$$R = Z_{menée} / Z_{menante}$$

Ces variateurs mécanique présentent plusieurs inconvénients tels que l'entretien difficile, usure des éléments en contact, génère beaucoup de bruit, maintient difficile d'une vitesse constante lors des variations de la charge et pas de possibilité de commander à distance.

II.7.1.2 Variateur de vitesse électronique

C'est un mode performant utilisé pour le contrôle et la variation de la vitesse, il permet de démarrer des charges à forte inertie et d'optimiser la consommation d'énergie électrique en fonction de la vitesse surtout pour les installations puissantes.

Les variateurs électroniques les plus utilisés fournissent, à partir d'un réseau alternatif à fréquence fixe, une tension alternative triphasée de valeur efficace et de fréquence variable, comme l'illustré dans la figure (II.8).



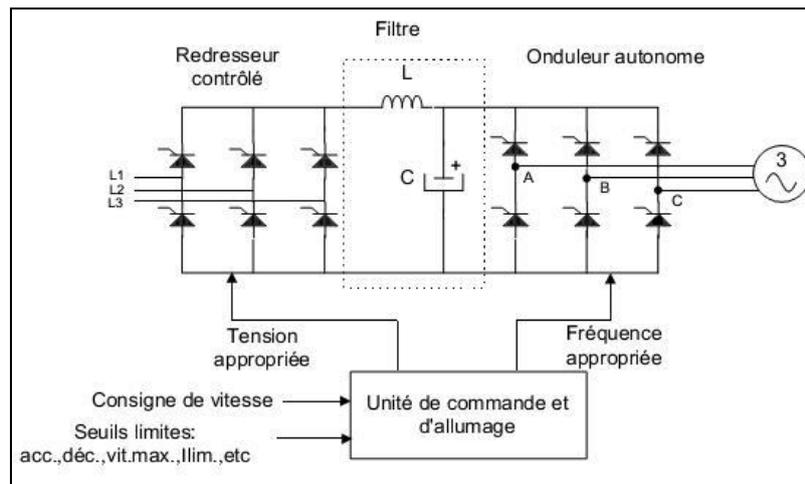
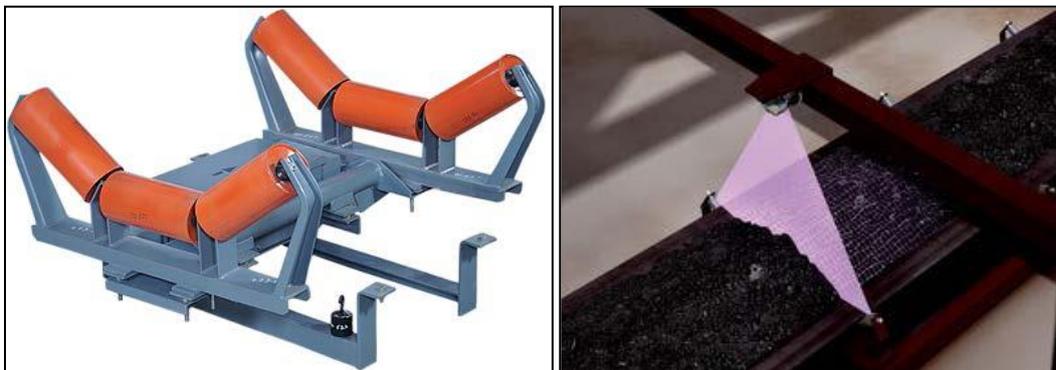


Figure II.8 Variateur de vitesse à fréquence variable

II.7.2 Dispositif de détection de débit du matériau

La valeur du débit du matériau doit être prédéterminé pour garantir une vitesse de chargement synchronisée avec la vitesse de la bande autorisée afin d'éviter la surcharge de la bande, pour cette raison on utilise un capteur de débit installé à proximité de la bande transporteuse ou par un Profil- mètre laser comme le montre dans la figure(II.9)

La valeur réelle du débit de la matière permet le suivi de la consommation d'énergie des convoyeurs à bande et d'évaluer les économies d'énergie.



(a) Capteur de débit de matériau

(b) Profil mètre laser

Figure II. 9 Les outils de mesures de débit du matériau [10]

II.8 Contrôle de la vitesse pendant le régime transitoire

Le processus de mise en vitesse de convoyeur à bande peut se faire dans les différentes conditions d'exploitation :

- Démarrage à vide,
- Démarrage en charge,
- Freinage brusque,
- Freinage lent,...

Le régime transitoire peut se dérouler dans plusieurs situations comme suivantes :

- **Démarrage normal**

C'est un démarrage où le convoyeur à bande démarre comme prévu. Dans ce type de démarrage, le moteur peut démarrer simplement par un démarreur connecté directement aux bornes d'alimentation du moteur. Ceci est valable uniquement pour les convoyeurs à bande ayant une puissance du moteur ne dépassant pas 15kW.

A ce jour les variateurs de vitesse sont largement utilisés pour le contrôle de la vitesse du convoyeur dans le but de réaliser un démarrage en douceur.

- **Régime intermittent**

Le convoyeur à bande travail en régime continu et la variation de la charge sur la bande qui est le résultat d'un mauvais dispositif de chargement peut provoquer des variations de couple en cours de fonctionnement qui peuvent être assimilés à des variations des régimes (intermittent), cela se traduit surtout par des surcharges thermiques du moteur, et un désalignement de la bande.

- **Arrêt normal**

C'est un arrêt planifié, il est réalisé de façon à contrôler le couple d'entraînement et la vitesse, dans ce cas les forces d'entraînement sont maintenues constantes mais inférieures aux résistances de mouvement.

- **Arrêt d'urgence**

Lorsqu'un événement d'urgence se produit (glissement de la bande sur le tambour moteur, déviation de la bande....) un arrêt d'urgence est effectué afin que la bande s'arrête dans un court de temps.

II.9 Risques pendant le régime transitoire

Au cours de régime transitoire, il peut se produire des accélérations importantes provoquées par exemple par des surtensions très élevées qui produiront des tensions supplémentaires sur la bande et seront la cause de la rupture de la bande, ces risques sont :

- Rupture de la bande au niveau des jonctions
- Glissement de la bande autour de tambour d'entraînement
- Déversement de la matière loin de la bande
- Surchauffe du moteur

Pour éviter les risques qui surviennent dans les régimes transitoires, l'accélération doit être contrôlée et surveillée.

II.9.1 Rupture de la bande au niveau des jonctions

La résistance de la bande est déterminée par la force de sa carcasse, mais le point le faible du point de vue résistance reste la jonction.



Figure II.10 Rupture de la bande au niveau des jonctions [10]

La norme DIN 22101 (Institut allemand de normalisation, 2015), tient compte de la tension maximale de sécurité qui est nettement inférieure à la résistance de la bande, à cause de la fatigue et la dégradation des jonctions de la bande, cette norme indique, le rapport entre la tension maximum de travail et la tension minimal de la rupture de la bande est appelé facteur de sécurité minimum [1], [11], [29].

Les équations suivantes expriment le facteur de sécurité minimum dans les deux régimes de fonctionnements (stationnaire et transitoire) :

$$S_{S,min} = \frac{T_{max,S}}{T_{min}} \quad (II.3)$$

$$S_{T,min} = \frac{T_{max,T}}{T_{min}} \quad (II.4)$$

Où

$S_{S,min}$: Facteur de sécurité minimum dans le régime stationnaire

$S_{T,min}$: Facteur de sécurité minimum dans le régime transitoire

$T_{max,S}$: Tension maximale dans le régime stationnaire, kN

$T_{max,T}$: Tension maximale dans le régime transitoire, kN

T_{min} : Tension minimale de la rupture de la bande, kN

Le facteur de sécurité minimum demandé dépend de trois facteurs principaux à savoir :

- Le comportement dynamique de la résistance à la fatigue des jonctions.
- L'allongement supplémentaire de la bande due des déviations de la bande autour des tambours, ce qui perturbe la transmission de l'effort à la traction.
- La surcharge de la bande se produisant temporairement, crée des tensions intermédiaires variables tout au long de la bande.

II.9.2 Glissement de la bande autour de tambour d'entraînement

Au cours du processus transitoire l'évolution de la totalité de la force de frottement dépend de la vitesse, pour les faibles vitesses l'équipement mécanique (tambour - bande) possède une variation linéaire du frottement dont l'adhérence passe par un maximum pour des glissements faibles, ensuite décroît à nouveau pour atteindre l'adhérence effective disponible au niveau du contact, mais avec une accélération excessive du convoyeur à bande un échauffement du tambour moteur entraîne la chute brusque du coefficient de frottement entre la bande et le tambour moteur.

La variation du coefficient de frottement provoque un glissement entre la bande et le tambour ceci provoque une usure intensive de la bande et du garnissage du tambour comme le montre dans la figure (II.11)



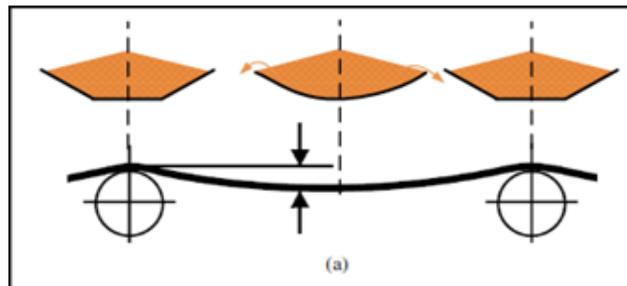
Figure II. 11 Usure du garnissage du tambour moteur

II.9.3 Déversement de la matière loin de la bande

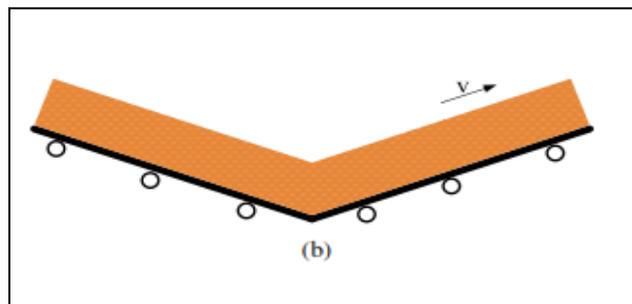
Le déversement de la matière sur les bords de bande se produit beaucoup plus au point de chargement et parfois ailleurs le long du convoyeur à bande ,ce phénomène est dû à la déviation de la charge au niveau des trémies d'alimentation,au débordement de la bande le long du trajet de transport, à un débit de la trémie de chargement supérieur à la capacité de transport,ceci provoque une surcharge de la bande au niveau de la zone de chargement et le déversement des matériaux en vrac loin de la bande,

Une variation excessive de la tension de la bande pendant le régime transitoire entraîne un fléchissement de la bande qui provoquant ainsi le déversement de la matière sur les bords de la bande.

Selon l'Association de (Conveyor Equipment Manufacturers (2005), si la tension de la bande est très faible, la bande crée des grands fléchissements entre les rouleaux du support voisines, le matériau peut se répandre sur les bords de bande à partir d'un fléchissement de plus de 3% de la portée entre deux rouleaux support, figure (II.12 a).



(a) Déversement de la matière causé par une faible tension



(b) Déversement de la matière causé par une tension élevée

Figure II. 12 Déversement de la matière [45]

D'autre part, dans le cas des convoyeurs à bande descendants, la tension élevée de la bande provoque le décollage de la bande des rouleaux des supports, voir la figure (II. 12 b)

II.9.4 Surchauffe du moteur

Le principe de fonctionnement du moteur est de convertir l'énergie électrique en énergie mécanique, lors de ce processus une partie de l'énergie est dissipée en pertes dans le moteur, ces pertes favorisent l'augmentation de la température du moteur pendant le fonctionnement en plus des accélérations excessives.

Au démarrage les moteurs fournissent un couple d'arbre supérieur au couple nominal pendant une courte période sans surchauffe, par contre si la surcharge perdure ou si la charge dépasse largement la charge autorisée, ceci augmente le risque de surchauffe du moteur.

II.10 Modèle d'énergie du convoyeur à bande

Au cours des dernières décennies plusieurs modèles d'énergie ont été développés pour estimer la consommation énergétique des convoyeurs à bande, la plupart de ces modèles sont basés sur des normes de conception des convoyeurs à bande telles que la norme DIN 22101 (Institut allemand de normalisation, 2015), et ISO 5048 (Organisation internationale de normalisation, 1989).

Le modèle énergétique basé sur la norme DIN22101 se base essentiellement sur l'estimation de la consommation d'énergie et l'évaluation de la performance des convoyeurs à bande à partir du contrôle de la vitesse.

Cette norme est proposée par l'Institut allemand de normalisation en 2015 ; elle sert pour le calcul et le dimensionnement des composants des convoyeurs à bande, elle est largement utilisée dans la pratique pour aider à la conception des convoyeurs à bande, ce institut suggère que la puissance mécanique nécessaire d'un convoyeur à bande P_m est déterminée par les forces d'entraînement F_d exercées sur le tambour d'entraînement et la vitesse de la bande transporteuse V .

$$P_m = F_d \cdot V \quad (II.5)$$

En tenant compte du rendement de système du convoyeur à bande et les pertes de puissance dans le système d'entraînement, la puissance électrique nécessaire d'un convoyeur P_e est égale :

$$P_e = \frac{P_m}{\tau_{sys}} = \frac{F_d}{\tau_{sys}} \cdot V \quad (II.6)$$

τ_{sys} : Le rendement de système du convoyeur à bande

Pendant le régime stationnaire, les forces motrices sont égales aux résistances au mouvement totales de F_f le long du trajet de transport.

$$F_d = F_f \quad (II.7)$$

Selon la norme DIN 22101 les résistances au mouvement totales sont réparties en quatre groupes et elles sont :

- 1- Résistance principale F_H ,
- 2- Résistances secondaires F_N ,
- 3- Résistances due à l'inclinaison F_{St} ,
- 4- Résistances spéciales F_S ,

$$F_f = F_H + F_N + F_{St} + F_S \quad (II.8)$$

II.10.1 Les résistances principales F_H

Ce sont les résistances se produisant sur tout le long du trajet de transport, elles sont le résultat des résistances à la rotation des rouleaux du brin chargé et vide, qui sont due au frottement dans les paliers des roulements et les résistances à la progression de la courroie suite à son fléchissement entre deux rouleaux porteurs.

Selon l'institut allemand de normalisation les résistances principales représentent jusqu'à 90% des résistances totales.

Afin d'estimer la résistance principale, ce dernier estime un coefficient de frottement artificiel pour évaluer la résistance principale comme suite :

$$F_H = f g L [m'_{roul} + (2 m'_{ban} + m'_{mat}) \cos \delta] \quad (II.9)$$

Où

L: la longueur du convoyeur, [m]

m'_{roul} : la masse métrique des rouleaux intermédiaires du brin supérieur, [kgm]

m'_{ban} : la masse métrique de la bande, [kgm]

m'_{mat} : la masse métrique de la matière, [kgm]

δ : angle d'inclinaison du convoyeur à bande, [°]

II.10.2 Les résistances secondaires F_N

Les résistances secondaires F_N ne se produisent qu'en tête et en queue des convoyeurs à bande, ils sont composés de cinq parties :

1. Résistance de frottement due à l'accélération du matériau au point de chargement, F_{Au}

2. Résistance due au frottement sur les parois latérales des rouleaux au point de chargement, F_{Schb}
3. Résistance de frottement entre le dispositif de nettoyage et la bande, F_{Gr}
4. Résistance due à l'enroulement de la bande sur les tambours, F_{Gb}
5. Résistance au niveau des paliers de tous les tambours, à l'exception de ceux d'entraînement, F_{Tr}

Selon l'institut allemand de normalisation les résistances secondaires représentent une faible proportion par rapport à la résistance totale des convoyeurs à bande, pour cette raison il propose un coefficient secondaire **C** pour évaluer et améliorer les résistances secondaires.

$$F_N = (C - 1)F_H \quad (II.10)$$

C : coefficient qui tient compte des résistances locales ayant lieu dans n'importe quel point du convoyeur (point de chargement, tambour de contrainte, dispositif de nettoyage ...)

II.10.3 Les résistances dues à l'inclinaison F_{St}

La résistance due à l'inclinaison, F_{St} , est le résultat de l'action de la dénivellation du matériau sur le transporteur en parcours inclinés, elle est déterminée physiquement d'après l'équation suivante :

$$F_{St} = Lm'_{mat}g \sin \delta = Hm'_{mat}g \quad (II.11)$$

La hauteur d'élévation H est positive lorsque les installations sont ascendantes et négative lorsqu'elles sont descendantes.

Dans le cas d'un convoyeur à bande avec un angle d'inclinaison de 5% la résistance due à l'inclinaison représente jusqu'à 65% de la résistance totale aux mouvements.

II.10.4 Les résistances spéciales F_S

Ces résistances sont :

- résistance de pincement due à la position inclinée des rouleaux porteurs dans le sens de marche de la courroie ;
- résistance due au frottement des bavettes de goulottes ou deguidages, lorsque ceux-ci agissent sur toute la longueur de la courroie.
- résistance due au frottement des dispositifs de nettoyage des tambours et de la courroie ;
- résistance due au retournement du brin inférieur de la courroie ;
- résistance due aux chocs lors du déversement des matériaux ;

- résistance due aux chariots verseurs.

Les résistances totales F_s d'un convoyeur à bande sont la somme des résistances individuelles mentionnées, ces résistances spéciales individuelles ne se produisent pas sur tous les convoyeurs à bande.

Ensuite, en prenant en compte la somme totale des résistances spéciales F_s , on peut estimer approximativement les résistances totales des convoyeurs à bande dans le régime stationnaire par le remplacement des équations (II.9), (II.10) et (II.11) dans l'équation (II.8) :

Ainsi

$$F_f = CLfg[m'_{roul} + (2 m'_{ban} + m'_{mat}) \cos \delta] + Hgm'_{mat} + F_s \quad (II.12)$$

On aura donc la puissance électrique nécessaire dans le régime stationnaire comme suite:

$$P_e = \frac{CLfg[m'_{roul} + (2 m'_{ban} + m'_{mat}) \cos \delta] + Hgm'_{mat} + F_s}{\tau_{sys}} \cdot V \quad (II.13)$$

II.11 Conclusion

La méthode de contrôle de la vitesse du convoyeur à bande est une approche techniquement possible à réaliser ; sa réussite permet de réduire la consommation d'énergie des convoyeurs à bande.

Nous avons également conclu qu'il existe différentes périodes de variation de la vitesse pendant le fonctionnement des convoyeurs à bande, ces périodes sont :

- La période qui caractérise les régimes non stables à savoir : démarrage, freinage et arrêt des convoyeurs.
- La période du régime stationnaire à charge nominale,
- La troisième période lorsque le convoyeur fonctionne en régime surchargé.

De là on peut déduire que la nécessité de la régulation de la vitesse est importante, et ce pour assurer un fonctionnement en charge nominale des moteurs électriques et rationaliser la commande des convoyeurs, tout en assurant une bonne force de traction accompagnée d'une réduction de la consommation énergétique du convoyeur à bande. C'est la raison pour laquelle on cherche un système de contrôle de la vitesse le plus convenable. Pour réussir un bon contrôle interviennent aussi les conditions d'emploi des convoyeurs à bande.

Ainsi, la revue de la littérature indique que les recherches actuelles sur le contrôle de la vitesse sont confrontées à deux défis majeurs à savoir :

- déterminer le temps minimum de réglage de la vitesse afin d'assurer une dynamique saine d'un convoyeur à bande pendant les régimes transitoires.
- rechercher un modèle énergétique précis pour évaluer le contrôle de la vitesse du convoyeur à bande.

Chapitre III

Surveillance et diagnostic des convoyeurs à bande

III.1 Introduction

La surveillance et le diagnostic des convoyeurs à bande représentent un enjeu scientifique et économique important et est motivé par les objectifs de sûreté de fonctionnement et de continuité de service.

Les convoyeurs à bande occupent une place de plus en plus importante dans les équipements industriels, surtout avec les nouvelles exigences en matière de traction électrique ou de production décentralisée d'énergie avec des nouvelles structures des convoyeurs à bande.

Les convoyeurs à bande sont très présents dans de nombreux processus industriels et miniers et leur surveillance est devenue un souci permanent grâce à leurs atouts, en termes de coût et de performance.

Le diagnostic des défaillances d'un convoyeur à bande a bénéficié d'un intérêt intense de recherche, lorsqu'il est réalisé avec efficacité, il représente un des moyens pour contribuer à obtenir un meilleur gain de productivité et ouvre la voie à une commande tolérante aux défauts, et doit par conséquent augmenter la robustesse du convoyeur à bande [35], [36], [44].

Dans ce chapitre, nous présentons les concepts de la surveillance et les différentes techniques du diagnostic des convoyeurs à bande.

L'objectif est de mettre en contexte l'utilisation des méthodes de diagnostic interne pour le diagnostic de ces installations.

III.2 Fiabilité des convoyeurs à bande

Le convoyeur à bande est un ensemble des composants interdépendants, conçus pour transporter les matériaux dans des conditions données et dans un intervalle de temps donné. Dans cet effet, il est important de définir clairement les éléments qui le caractérisent, à savoir :

La fonction, la structure, les conditions de fonctionnement, les conditions d'exploitation et l'environnement dans lequel il est appelé à opérer [45].

La fiabilité du convoyeur à bande est représentée par son aptitude à être disponible dans son ensemble pour le transport des matériaux en vrac dans des conditions d'utilisation et dans un délai déterminé.

A un instant t , la fiabilité se mesure par la probabilité que l'entité E accomplisse une fonction requise dans les conditions données pendant l'intervalle de temps $[0 ; t]$, ainsi

$$R(t) = P[E \text{ soit non défaillant sur } [0, t] \quad \text{III.1}$$

L'aptitude contraire est la probabilité de défaillance de l'entité, quelquefois appelée défiabilité. On écrit :

$$\hat{R} = 1 - R(t) \quad \text{III.2}$$

L'évaluation de cette probabilité peut être faite différemment selon la nature des entités considérées ou selon les moyens dont on dispose pour le faire.

- **Fiabilité opérationnelle** :(observée) résulte de l'observation et de l'analyse du comportement d'entités identiques dans des conditions opérationnelles.
- **Fiabilité extrapolée** : qui résulte d'une extension (par extrapolation définie ou par interpolation) de la fiabilité opérationnelle à des durées ou des conditions différentes.
- **Fiabilité prévisionnelle** :(prédite) qui estime une fiabilité future à partir des considérations sur la conception des systèmes et la fiabilité de leurs composants.
- **Fiabilité intrinsèque** : mesurée au cours d'essais spécifiques effectués dans le cadre d'un programme d'essais entièrement défini.

La fiabilité d'un système est une mesure de la quantité de service rendu selon le système étudié, elle s'exprime en termes de temps, de kilomètres, d'heures de fonctionnement ou autre.

III.3 Surveillance des convoyeurs à bande

Les systèmes des convoyeurs à bande sont des dynamiques hautement non linéaires et changeantes au cours du temps. Ils se caractérisent par le fait de posséder un grand nombre de variables, qui doivent être prises en considération au moment d'effectuer la surveillance, pour ces systèmes l'incertitude et l'imprédictibilité rendent les décisions difficiles. L'automatisation apparaît comme le plus important facteur de développement de ces processus.

D'un autre côté, dans un système du convoyeur à bande, il est cependant impossible de tout anticiper et planifier, c'est pourquoi des opérateurs humains sont encore souvent en charge des grandes installations industrielles. Les humains ont en effet pour principale qualité de savoir gérer l'imprévu et l'incertain, et donc de pouvoir créer des stratégies adaptées quand surviennent des situations de dysfonctionnement.

Il est donc clair que pour les convoyeurs à bande, il est essentiel de disposer des systèmes de surveillance et de diagnostic qui permettent de travailler avec un niveau d'incertitude élevé et d'inclure la connaissance humaine.

III.4 Techniques de surveillance des convoyeurs à bande

L'objectif de la surveillance est de vérifier l'état courant du procédé en incluant la détection de l'apparition d'un défaut.

Elle est difficile de surveiller un grand nombre des variables en même temps par un opérateur humain car elle est nécessite beaucoup de main-d'œuvre surtout lorsqu'il s'agit de convoyeur à bande de grande distance.

Un inspecteur doit marcher sur toute la longueur du convoyeur pour inspecter ses composants, la figure (III.1) montre une inspection humaine.

En plus, les résultats de l'inspection humaine peuvent être contradictoires en raison du fait que toutes les inspections ne sont pas effectuées par le même inspecteur.



Figure III.1 Inspection humaine du convoyeur à bande [56]

Une technique de surveillance automatisée est alors nécessaire pour faire l'analyse des variables pertinentes et donner une information plus claire et utile pour que l'opérateur puisse prendre des décisions, les principales techniques dans la surveillance du convoyeur à bande sont présentées dans le tableau III.1.

Tableau III.1 Paramètres et techniques de surveillance du convoyeur à bande [10]

Paramètres	Composants	Technologies
La bande	La surface extérieure	Détection visuelle (caméra)
	La surface intérieure	Détection conductrice
	Les jonctions	Rayon X
La vitesse	La bande	Tachymètre
	Le réducteur	Codeur optique / magnétique
	Le moteur	Capteur de détection magnétique
Le couple	L'arbre du moteur	Capteur du couple
	L'arbre de réducteur	
	L'arbre de tambour	
La tension	Le tendeur	dynamomètre
	La bande	
Les vibrations	Le tambour	Capteur de vibration (vibrotest) Accéléromètre
	Les rouleaux du support	
	Le réducteur	
	Le moteur	
	Le tendeur	
La puissance	Le moteur	Wattmètre
La position	Désalignement de la bande	Capteur d'alignement
	Déplacement de tendeur	Codeur optique
La température	Le moteur	Thermocouple Caméra infrarouge
	Le réducteur	
	Le tambour moteur	
	Les rouleaux du support	

III.4.1 Surveillance de l'état de la bande

La bande transporteuse est une combinaison de trois éléments principales telles que :

1. La surface extérieure de la bande (les couches supérieures et inférieures)
2. La surface intérieure de la bande (les câbles en acier ou en tissu)
3. Les jonctions de la bande

III.4.1.1 Surveillance de la surface extérieure de la bande



Figure III.2 Surveillance de la surface extérieure de la bande [49]

Pour une surveillance automatisée de la surface de la bande on utilise des caméras à vitesse plus élevée, pour la télésurveillance et la reconnaissance des formes avec des systèmes informatiques comme l'illustre dans la figure (III.2), les caractéristiques de base du processeur d'image comprennent des algorithmes de reconnaissance et la possibilité de prendre des images partielles pour enregistrer la mémoire du processeur et le traitement de l'arithmétique qui facilite le taux de calcul élevés.

Des caméras simples peuvent être utilisées pour scanner l'empreinte sur les bandes afin de rassembler les informations de fabrication de la bande [50] [54].

III.4.1.2 Surveillance de la surface intérieure de la bande

La surveillance conductrice est la technologie la plus utilisée pour surveiller la surface intérieure de bande dans le cas des bandes en acier. En principe, un système de surveillance conducteur contient un ou plusieurs conducteurs qui génèrent ou réfléchissent des signaux vers un ou plusieurs détecteurs.

Des conducteurs peuvent être intégrés dans la carcasse intérieure de la bande pour former un système de surveillance conducteur intégré. Dans ce type d'applications, les conducteurs peuvent être des bobines de circuit, des boucles conductrices, des puces de transpondeur ou des aimants.

Cette technique est réalisée par la mesure continue de la distance entre les deux conducteurs où une augmentation de la distance indique potentiellement une tension accrue de la bande ou des dommages aux niveaux des jonctions.

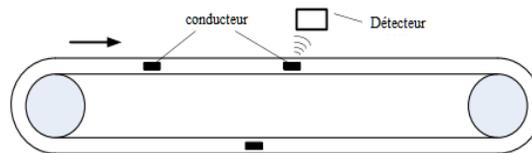


Figure III.6 Surveillance de la surface intérieure de la bande [1]

III.4.1.3 Surveillance des jonctions

L'application de la technique des rayons X est réalisée par l'utilisation d'une caméra numérique à rayons X à faible consommation d'énergie pour numériser l'état de la bande. Les images produites par une telle caméra à rayons X peuvent révéler des dommages potentiels d'une bande, par exemple un endommagement des jonctions comme le montre la figure (III.5).

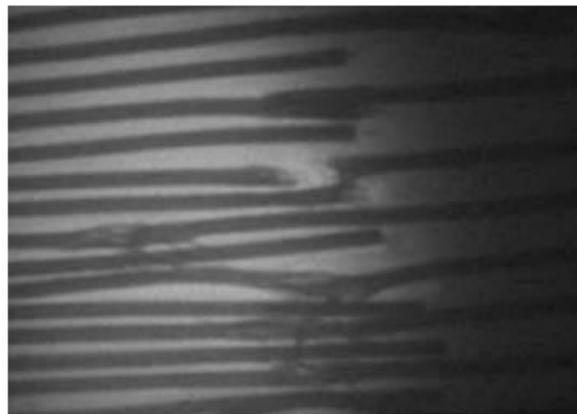


Figure III.5 Surveillance des jonctions de la bande par les rayons X [45]

III.4.2 Surveillance de la vitesse de la bande

Cette technique de surveillance est non seulement nécessaire pour confirmer que le convoyeur fonctionne effectivement à sa vitesse nominale, mais surtout pour vérifier la dynamique de démarrage et d'arrêt du système de convoyage, pour capter le signal de la vitesse

de la bande dans les différents régimes de fonctionnement on utilise un tachymètre capteur de la vitesse.

il s'installe près de la tête motrice entre le brin supérieur et inférieur, la tension du ressort nous donne une adhérence parfaite entre la roue à gomme et la bande inférieure qui à son tour assure la rotation de la roue du capteur et indique toute différence entre la vitesse de la bande mesurée et la vitesse linéaire de la rotation de tambour pendant le fonctionnement du convoyeur comme le montre la figure (III.9).

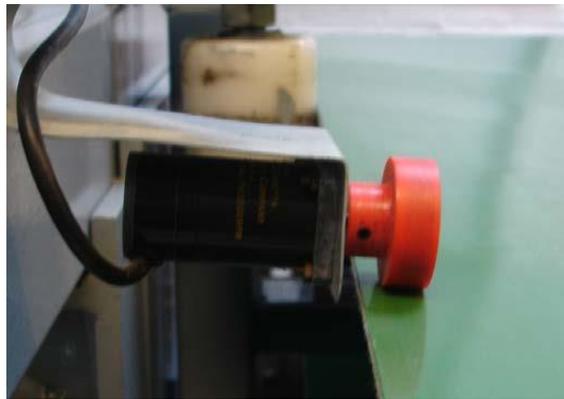


Figure III.9 Surveillance de la vitesse de la bande par tachymètre [54]

III.4.3 Surveillance de la force, la tension et le couple

Pour valoriser la variation de la tension sur la bande pendant les régimes de fonctionnement du convoyeur, on dispose d'un dynamomètre mécanique. Le principe de fonctionnement de ce dynamomètre consiste en l'exercice d'une pression entre le tambour de renvoi et le dynamomètre pour voir l'aiguille du comparateur indiquer la valeur de la force, la tension et le couple.

III.4.4 Surveillance des vibrations

La surveillance par l'analyse vibratoire des systèmes du convoyeur à bande est l'outil préventif de la maintenance. Cette technique est largement utilisée dans la majorité des installations. Elle détecte pratiquement toutes les anomalies susceptibles d'apparaître dans les machines tournantes. Un défaut d'alignement, un roulement usé, ou un jeu, s'explique par un changement des efforts internes que subit la machine, cela conduit à une modification de son

comportement vibratoire. On peut suivre et surveiller l'état d'un équipement, si on place des capteurs de vibration aux endroits où se transmettent ces efforts (sur les paliers des machines). L'avantage principal de l'analyse vibratoire est la facilité de prendre des mesures, la détection des défauts à un stade précoce et la possibilité de réaliser un diagnostic approfondi pour déterminer l'origine

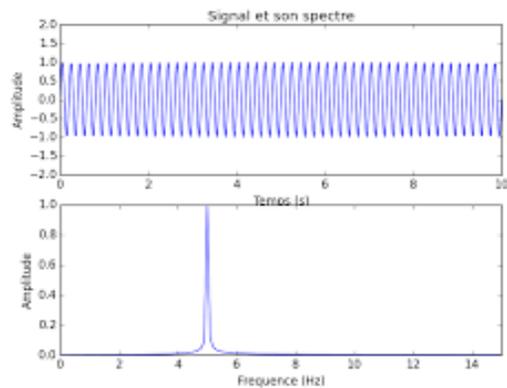


Figure III.10 Détection des défauts par l'analyse vibratoire [54]

Cependant, la méthode de l'analyse vibratoire n'est pas très pratique pour surveiller les vibrations des rouleaux du support en raison du grand nombre et de la distribution des rouleaux. Pour cet effet on utilise le rouleau intelligent équipé par un accéléromètre pour mesurer les vibrations des rouleaux de support et le transfert des données en temps réel, voir la figure (III.14)



Figure III.14 Le rouleau du support intelligent [56]

III.4.5 Surveillance du désalignement de la bande

Les capteurs d'alignement de la bande sont utilisés pour surveiller la position transversale de la bande comme le montre la figure (III.11).



Figure III.11 Surveillance du désalignement de la bande [49]

III.4.6 Surveillance de la température

Plusieurs défauts sont produits sur un convoyeur à bande tel que (défaut d'arbre du tambour, défaut d'engrenage d'un réducteur, défauts de roulement du moteur...etc.) ces défauts sont traduits toujours par une élévation de température, cette élévation, apparaît instantanément par l'utilisation de camera à infrarouge, ainsi, la thermographie infrarouge est une technologie efficace pour la surveillance et la localisation des problèmes rapidement et en toute sécurité figure (III.12).

Avec la thermographie infrarouge on peut visualiser les défauts avant qu'une panne sur les installations ne se produise et qu'elle ait des conséquences fâcheuses (perturbation ou arrêt de la production, début d'un incendie dans le pire des cas).



Figure III.12 Détection des défauts par la caméra infrarouge [54]

Cependant, la méthode de la caméra infrarouge n'est pas très pratique pour surveiller la température des rouleaux du support en raison du grand nombre et de la distribution des rouleaux. Pour cet effet on utilise un système de détection de température répartie à base des fibres optiques, le câble à fibres optiques est fixé aux rouleaux du supports pour surveiller la température, le système est capable de détecter un roulement défectueux en justifiant l'hypothèse que la température des supports peut représenter l'état des rouleaux installés, comme le montre dans la figure (III.15). [50] [55].



Figure III.15 Surveillance de température à base des fibres optiques [56]

III.5 Diagnostic des défauts des convoyeurs à bande

De nos jours, les convoyeurs à bande modernes deviennent de plus en plus complexes et leurs commandes de plus en plus sophistiquées. En même temps, la fiabilité, disponibilité et la sûreté de fonctionnement sont primordiales ; elles constituent de véritables enjeux pour les entreprises actuelles. Le diagnostic des convoyeurs à bande s'impose pour l'amélioration de la surveillance des composantes citées plus haut.

Le diagnostic d'un convoyeur à bande est l'identification du mode de fonctionnement, à chaque instant, par ses manifestations extérieures. Son principe général consiste à confronter les données relevées au cours du fonctionnement réel du convoyeur avec la connaissance que l'on a de son fonctionnement normal ou défaillant [39].

Le diagnostic est défini essentiellement par deux tâches :

- l'observation des symptômes de la défaillance.
- l'identification de leurs causes à l'aide d'un raisonnement logique [40].

Les méthodes de diagnostic sont nombreuses mais on peut les regrouper suivant deux axes :

1. Les méthodes basées sur des outils mathématiques qui permettent de modéliser les systèmes, les causes et les symptômes de défaillance, pour faciliter les démarches inductives et déductives, elles relèvent du domaine des méthodes de diagnostic interne.
2. Les méthodes capables de reproduire sous forme informatique, les modes de raisonnement de l'homme. Ces derniers sont basés sur la discipline de l'intelligence artificielle et sont du domaine des méthodes de diagnostic externe.

III.5.1 Diagnostic par les méthodes internes

Le diagnostic des défaillances par des méthodes internes nécessite un modèle du système à surveiller, à défaut on élabore un qui convient (fiable et suffisamment précis).

Ce modèle peut varier selon les objectifs, il peut être plus ou moins représentatif d'un modèle de bon fonctionnement ou de fonctionnement caractéristique d'une ou plusieurs défaillances.

Habituellement un modèle est une description formelle (Mathématique) du système à surveiller. On peut avoir plusieurs modèles mathématique du même système comme en automatique par exemple, peuvent être à temps continu ou discret, descriptibles au moyen d'équations différentielles ou d'équations aux différences. Ces méthodes de diagnostic internes reposent sur la comparaison de mesures réelles sur le système à surveiller et des informations que fournit le modèle.

Les écarts caractérisent le fonctionnement du système :

- à un écart nul, correspond un fonctionnement de type normal.
- à un écart non nul, correspond un fonctionnement de type défaillant.

Ces méthodes internes se classent en deux grandes catégories :

- les méthodes de redondance analytiques qui utilise les techniques d'estimation d'état et les techniques d'estimations paramétriques qui ont pour but l'estimation des paramètres du modèle.
- Les méthodes internes de diagnostic se distinguent selon le modèle utilisé :

- **Modèle de simulation :**

C'est une description de la structure physique et du comportement du système. Les modèles analytiques utilisés dans ce mode de diagnostic sont représentés par des équations d'état ou des fonctions de transfert. Les perturbations sont prisent en compte de manière additive à travers des matrices. Les défauts sont prisent en compte soit de la même manière soit en modifiant la structure même du modèle.

- **Equation de parité** une relation ou équation qui génère un résidu est appelée relation ou équation de parité. Les équations de parité primaire peuvent être obtenues à partir des équations qui décrivent la structure et le comportement du système et les équations de parité additionnelles sont obtenues par l'intermédiaire de transformations afin d'améliorer la tâche de diagnostic [43].

- **Observateur :**

Un modèle capable d'engendrer une approximation du vecteur d'état est appelé estimateur d'état ou observateur d'état. Le modèle est décrit sous une représentation de variables d'état. L'analyse du comportement des estimations des états qui ont un sens physique permet la réalisation du diagnostic.

- **Estimation paramétrique :**

La détection et la localisation des défaillances par estimation paramétrique, consiste à déterminer les valeurs numériques des paramètres structuraux d'un modèle de connaissance qui gouverne le comportement dynamique du système. La première étape est donc, l'élaboration d'un modèle mathématique de complexité raisonnable pour caractériser la machine en fonctionnement sain et dégradé.

- **Modélisation des signaux :**

Dans cette méthode, le contenu spectral, l'évolution temporelle des variables mesurées sont exploitées pour détecter et localiser les défauts. L'analyse spectrale plus particulièrement est utilisée depuis de très nombreuses années pour détecter des défaillances dans les machines électriques. Ces cas se prêtent bien à cette approche dans la mesure où de nombreux défauts (rupture de barres, dégradations des roulements,...) se traduisent par l'apparition de fréquences caractéristiques directement liées à la vitesse de la machine.

III.5.2 Diagnostic par les méthodes externes

Les méthodes externes de diagnostic supposent qu'aucun modèle n'est disponible pour décrire les relations de cause à effet. La seule connaissance repose sur l'expertise humaine par apprentissage. Le module de reconnaissance utilise les observateurs issues du système, des entrées et des sorties, afin de trouver les relations de cause à effet. Dans ces méthodes de diagnostic le facteur déterminant est l'algorithme de classification.

III.5.3 Diagnostic par les méthodes inductives

Ces méthodes de diagnostic correspondent à une approche montante ou recherche en avant. Il s'agit de trouver le défaut à partir de ses effets sur le système. Ces méthodes utilisent un mécanisme de raisonnement en avant qui a pour objectif d'interpréter les symptômes ainsi que leurs combinaisons afin de trouver le défaut.

III.5.4 Diagnostic par les méthodes déductives

Le raisonnement en arrière est la principale caractéristique de ces méthodes. Les méthodes déductives doivent trouver quels sont les effets dans les systèmes. Une vérification des «effets trouvés par rapport aux effets possibles » permet de confirmer Ou d'infirmer l'existence du défaut. Ce qui justifie notre raisonnement.

III.6 Stratégies de la maintenance des convoyeurs à bande

Il existe deux types des de la maintenance pour les systèmes des convoyeurs à bande :

- La maintenance préventive
- La maintenance corrective

III.6.1 Opération de la maintenance préventive

La remise en service du système obéit à certaines conditions [4] :

- Vérification de l'état de la bande transporteuse ;
- Graissage les paliers ;
- Vérification de l'état et du niveau de l'huile des réducteurs ;
- Elimination de tout danger pouvant provenir de l'unité d'entraînement ;
- Lubrification des réducteurs ;
- Conformité de la tension et fréquence du réseau avec les valeurs indiquées sur la plaque signalétique ;

Contrôle pendant la mise en service

Pendant la mise en service on doit contrôler les points suivants :

- Bonne marche du moteur, pas de fluctuations de vitesse de rotation, pas de niveau de bruit élevé ;
- Pas de perte d'huile ;
- Pas de fortes vibrations ;
- surveiller la bande s'il n'a pas de débordement ;

Entretien

Le convoyeur ne doit pas être mis en service ou doit être mis hors service si des détériorations ou défauts de fonctionnement sont constatés. Il peut seulement être remis en service après suppression des défauts.

Le plan d'entretien périodique du convoyeur à bande est représenté par :

Après chaque déchargement navire

- Nettoyer toute l'instrumentation (déport de bande, bourrage, contrôleur de rotation, arrêt d'urgence) ;
- Nettoyer l'ensemble bande, tambours, rouleaux supérieur et inférieur et charpente
- Nettoyer la jetés du transporteur ;
- Contrôler le niveau de huile des réducteurs ;
- Vérifier l'étanchéité des coffrets électriques et des boîtes de dérivations
- Examiner le moteur et nettoyer les voies de passage de l'air de refroidissement

Après trois mois de fonctionnement

- Vérifier l'alignement du groupe de commande ;
- Contrôler que les branchements électriques et les vis sont bien serrées ;
- Vérifier qu'il n'y a pas de trace d'oxydation sur les cosses de connexion électrique ;
- Relever les valeurs d'intensité de moteur à vide et en charge ;
- Lubrifier les réducteur ;
- Vérifier l'état de la bande ;
- Démontez, nettoyez, remontez et graissez tous les paliers (pied, tête, contrainte) ;

III.6.2 Opérations de la maintenance corrective

Ces opérations peuvent être classées en deux groupes d'actions :

La localisation de défaillance :

C'est l'action qui conduit à rechercher précisément les éléments par les quels la défaillance se manifeste, on distingue [4] :

Le test : c'est une opération qui permet de comparer les réponses d'un système à une sollicitation appropriée et définie, avec celles d'un système de référence, ou avec un phénomène physique significatif d'une marche correcte ;

La détection : c'est l'action de déceler au moyen d'une surveillance accrue, continue ou non, l'apparition d'une défaillance ou l'existence d'un élément défaillant ;

Le dépistage : c'est une action qui vise à découvrir les défaillances dès leur début par un examen systématique sur des équipements apprenant en état de fonctionnement ;

Le diagnostic : c'est l'identification de la cause probable de la défaillance à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test. Le diagnostic permet de confirmer, de compléter ou de modifier les hypothèses faites sur l'origine et la cause des défaillances et de préciser les opérations de maintenance correctives nécessaires ;

La remise en état :

La remise en état de fonctionnement peut consister à réaliser l'une des opérations suivantes :

a. Le dépannage

C'est une action sur un bien en panne, en vue de la remettre en état de fonctionnement compte tenu de l'objectif, une action de dépannage peut s'accommoder de résultats provisoires et de conditions de réalisation hors règles de procédures, de coûts et de qualité, et dans ce cas sera suivie de la réparation.

b. La modification

C'est une opération à caractère définitif effectuée sur un bien en vue d'améliorer le fonctionnement, ou d'en changer les caractéristiques d'emplois [4].

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons défini la fiabilité d'un système de convoyeur à bande ; non seulement pour introduire certaines définitions mais également pour mettre en évidence l'ampleur de l'effort nécessaire à mettre en place un système de maintenance adéquat des bandes transporteuses.

On présente les différents concepts généraux sur lesquels se base le diagnostic des convoyeurs à bande.

Parmi les méthodes proposées dans la littérature, nous nous sommes particulièrement intéressés à celles basées sur la méthode interne. Nous avons montré qu'à partir des équations mathématiques il est possible d'établir un modèle comportemental du procédé qui soit utile pour identifier les états fonctionnels incluant les états de défaillance.

L'utilisation de méthodes de diagnostic interne pour le diagnostic des convoyeurs à bande est une alternative intéressante à l'utilisation d'un modèle mathématique et ces méthodes fournissent généralement de bons résultats permettant d'identifier facilement la cause de la défaillance du système parce que la définition des états est directement en relation avec les variables de ce dernier.

Il est important de connaître les grandeurs et les mécanismes qui en résultent pour pouvoir implanter un système de maintenance efficace et rentable. On définit les techniques de surveillance des convoyeurs à bande.

En résumé, la surveillance de l'état actuel des convoyeurs à bande repose principalement sur les inspecteurs humains ce qui est coûteux et incohérent. L'utilisation de capteurs pour faciliter l'inspection et d'autres solutions de surveillance automatisées sont en cours de développement. Cependant, le choix et l'emplacement des capteurs dans ces solutions est primordial ; la réussite d'une surveillance efficace passe par l'emplacement optimal (dans les points névralgiques) des différents capteurs

Chapitre IV

Modélisation et simulation du facteur de traction

IV.1 Introduction

La transmission de l'effort de traction du tambour moteur à la bande s'effectue par adhérence, ce qui nous mène directement au frottement.

Le frottement, désigne l'ensemble des phénomènes qui naissent dans les zones superficielles de deux corps maintenus en contact, et effectuant un mouvement l'un par rapport à l'autre, en l'absence de lubrification.

Les premiers travaux que l'on connaît sur le frottement sont ceux de Léonard de Vinci au début du 16ème siècle.

Suivi plus tard par ceux de F. P. Bowden et D. Tabor font une synthèse et améliorent les résultats obtenus sur l'analyse du frottement. [59]

G. Duvaut et J.L. Lions [60] dans la continuité des études des problèmes de l'élasticité comme minimisation de fonctionnelle quadratiques, posent le problème du corps élastique glissant avec frottement sous la forme d'une inéquation variationnelle. Ce sera aussi le départ de beaucoup de travaux.

La loi de Coulomb appliquée au problème de Signori se révèle poser de nombreux problèmes mathématiques. De plus elle ne rend pas compte de tous les phénomènes observés lors du frottement de deux corps en contact.

Malgré l'ancienneté de l'intérêt porté à ce phénomène, la compréhension des mécanismes entrant en jeu est restée longtemps très lacunaire. Il faut attendre les dernières décennies et l'accumulation de données expérimentales et de résultats théoriques pour que des progrès importants soient faits.

Les phénomènes qui sont très à l'origine des forces de frottement sont très divers. On admet généralement que le glissement des aspérités en contact engendre localement des hautes températures qui permettent des processus physico-chimiques tels que la déformation plastique des aspérités, la formations d'alliages, de fusions suivies de trempes, d'oxydation etc....

Les mécanismes microscopiques qui produisent le frottement sec peuvent être de différentes natures selon les conditions du contact. Cela, ajouté à la difficulté des mesures expérimentales, explique que malgré les nombreuses études sur le sujet le lien entre le comportement microscopique ne soit pas encore clairement élucidé.

Au 18ème siècle on s'intéresse à la rugosité des surfaces et L. Euler fait la différence entre frottement statique et frottement dynamique grâce à des expériences de petits solides glissant sur des plans inclinés. Il estime que cette différence est due au fait que plus le glissement est

rapide plus les aspérités d'une surface sautent d'une aspérité de la surface opposée à l'autre, réduisant ainsi le contact.

C. A. Coulomb, à partir de nombreuses expériences, confirme les lois d'Amontons. Il pose le problème de la dépendance à la rugosité des surfaces et du rôle de l'adhésion. Il est en outre le premier à faire référence à une augmentation du coefficient statique avec le temps de contact stationnaire.

En 1933, A. Signorini pose le problème général de l'équilibre d'un corps élastique en contact sans frottement avec une fondation rigide.

L'amélioration du facteur de traction de conception $e^{f\alpha}$ est en lien direct avec le rendement de la machine, la durée de vie de la bande, le contrôle et la surveillance de l'installation.

La relation entre la force de traction à l'entrée et à la sortie du tambour d'entraînement est exprimée en équation mathématique dans laquelle on tient compte des caractéristiques techniques de la bande, de la configuration du convoyeur et son utilisation [59].

Le modèle développé peut être utilisé comme un outil du diagnostic pour contrôler les limites d'élasticité de la bande afin d'éviter le glissement entre la bande et le tambour d'entraînement.

Ceci permettra d'évaluer et d'estimer les réserves d'adhérence et de prévoir les risques de glissement.

Cette approche s'apparente à la méthode du diagnostic interne qui permet d'assurer le contrôle et la surveillance du convoyeur à bande pour éviter une usure excessive de la bande.

IV.2 Théorie de la transmission de l'effort de traction par tambour moteur

Le frottement, désigne l'ensemble des phénomènes qui naissent dans les zones superficielles de deux corps maintenus en contact, et effectuant un mouvement l'un par rapport à l'autre, en l'absence de lubrification.

La loi de frottement sec est un modèle mathématique reliant les principaux paramètres qui entrent en jeu dans les mécanismes du frottement sec.

Cependant, comme suggéré par Euler (1762) et Entelwein (1832), le frottement entre le tambour d'entraînement et la bande est limité, le glissement de bande se produit lorsque la force d'entraînement dépasse le frottement disponible, dans le cas où les forces d'entraînement dépassent les forces de frottement maximales disponibles entre la bande et le tambour d'entraînement la bande glisse autour de tambour d'entraînement.

Si le patinage de la bande se produit, le tambour d'entraînement ne peut pas entraîner la bande comme prévu, car la force d'entraînement disponible est inférieure à celle requise.

Si le glissement de la bande continue dans la mesure où il ralentit le convoyeur, il peut se produire un blocage de l'alimentation de la bande.

De plus le mouvement relatif provoque une usure du garnissage inférieur de la bande et le revêtement de surface de tambour d'entraînement [60].

Les calculs des forces de frottement maximales disponibles sont détaillés comme suite.

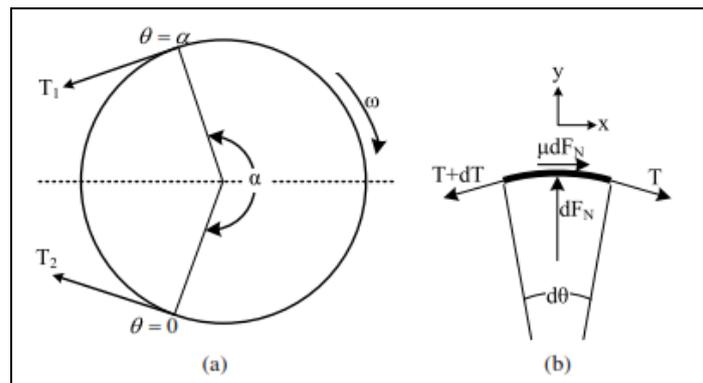


Figure IV.1 Principe d'entraînement par frottement du convoyeur à bande

La base du calcul est l'intégration des forces de frottement autour de tambour d'entraînement comme le cas de la figure (IV.1.a) où le tambour entraîne la bande dans le même sens des aiguilles de montre.

La figure (IV.1.b) illustre une bande d'une longueur finie qui se penche sur une petite section du tambour d'entraînement selon un angle $d\theta$, la tension de la bande augmente de T à $T + dT$ comme le montre le diagramme (b)

En supposant que l'effort normal est dF_N exercé sur le tronçon de bande avec μ le coefficient de frottement entre la bande et le tambour d'entraînement, alors la force de frottement maximale sans patinage de la bande est μdF_N .

Les forces distribuées sur la bande selon la direction x sont :

$$\sum F_x = 0 \tag{IV.1}$$

$$T \cos \frac{d\theta}{2} + \mu(dF_N) - (T + dT) \cos \frac{d\theta}{2} = 0 \tag{IV.2}$$

Comme l'angle de $d\theta$ est infiniment petit on pose $\cos \frac{d\theta}{2} \sim 1$, l'équation (IV.2) est donc :

$$\mu dF_N = dt \quad (IV.3)$$

De même, les forces dans la direction y sont égales à :

$$\sum F_y = 0 \quad (IV.4)$$

$$dF_N - (T + dT) \sin \frac{d\theta}{2} - T \sin \frac{d\theta}{2} = 0 \quad (IV.5)$$

Ce qui nous donne :

$$dF_N = T d\theta \quad (IV.6)$$

Puisque $\sin \frac{d\theta}{2} \sim 0$, puis en remplaçant l'équation IV.6 par IV.3

$$\frac{dT}{T} = \mu d\theta \quad (IV.7)$$

Ensuite, l'intégration sur l'angle de contact total (angle d'enroulement) α nous donne :

$$\int_{T_2}^{T_1} \frac{dT}{T} = \int_0^\alpha \mu d\theta \quad (IV.8)$$

Ce qui nous donne la tension maximale de la bande sans glissement:

$$T_1 = T_2 e^{\mu\alpha} \quad (IV.9)$$

$e^{\mu\alpha}$ est appelé facteur de traction réel du convoyeur à bande obtenu d'après la construction de ce dernier.

En général pendant l'exploitation des convoyeurs à bande deux régimes se présentent :

- Le régime moteur.
- Le régime de freinage (générateur).

L'inéquation caractéristique du régime moteur (généralement pour les convoyeurs à bande

ascendants) est:

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{T_{ent}}{T_{sort}} \leq e^{\mu\alpha} \quad (IV.10)$$

Dans ces conditions l'augmentation de la charge sur la bande du convoyeur est limitée par le facteur $e^{\mu\alpha}$, parce que dans le cas contraire la tension à l'entrée T_{ent} augmente, et Pour une valeur donnée de T_{ent} l'inégalité ne sera pas respectée, ce qui signifie que la bande est en patinage sur le tambour moteur[60].

Dans les conditions concrètes le rapport T_{ent} / T_{sort} caractérise le facteur de traction réel d'exploitation et dépend de la résistance au mouvement de la charge, de la bande, des rouleaux et de la distance de transport... Ce dernier doit être toujours comparé au facteur de traction d'après la construction $e^{\mu\alpha}$ qui dépend à son tour des propriétés de revêtement des tambours, et de l'angle d'enroulement...

L'inéquation caractéristique du régime de freinage (générateur) prend la forme :

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_{sort}}{T_{ent}} \leq e^{\mu\alpha} \quad (IV.11)$$

Ce régime se distingue du premier où nous avons le renversement des rôles. La bande devient l'organe moteur contrairement à ce qui se passe dans le régime moteur, c'est pourquoi l'augmentation de la charge tend toujours à diminuer la tension à l'entrée, et le régime reste toujours limité par le facteur de construction $e^{\mu\alpha}$ [61].

IV.3 Analyse des réserves de force de traction du convoyeur

A base de cette théorie nous allons déterminer le facteur de traction possible à réaliser pour les convoyeurs à bande (représenté par « a »), que l'on compare par la suite avec le facteur d'après la construction $e^{\mu\alpha}$. Pour cela on considère le schéma cinématique d'un convoyeur à tambour unique installé sous angle β (voir la figure IV.2) où on représente par :

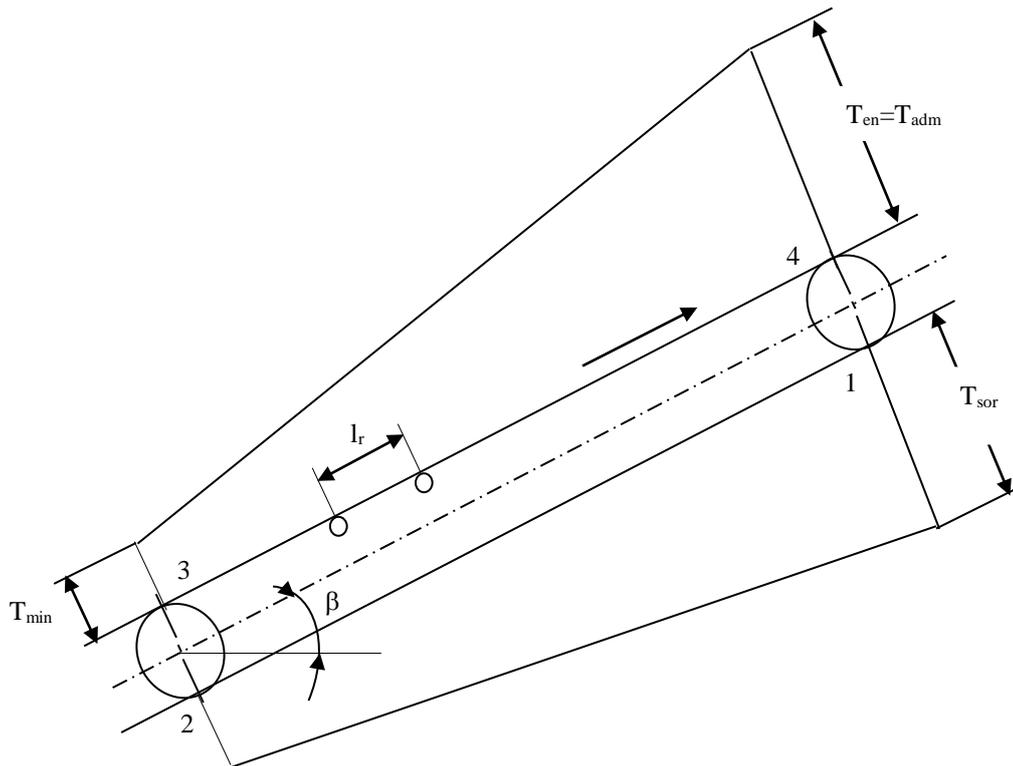


Figure IV.2 Diagramme de tension du convoyeur à bande

l_r : la distance entre les rouleaux porteurs (m),

T_{\min} : la tension minimale sur la bande (daN),

T_{adm} : la tension admissible de la bande (daN)

On détermine le facteur de traction réel du convoyeur en tenant compte d'une rupture entière de la bande, ainsi au point caractéristique 4 nous avons la tension égale à la tension admissible de la bande (T_{adm}).

$$T_{\text{adm}} = \frac{T_{\text{rup}}}{m} = \frac{\sigma_r \cdot i \cdot B}{m} \quad (\text{IV.12})$$

Où

T_{rup} : force de rupture de la bande (daN)

σ_r : Résistance spécifique à la rupture (daN)

i : Nombre de plis de la bande

m : facteur de sécurité

Ensuite on détermine la tension minimale au point 3 selon la condition de la bande tendue partout, nous avons alors:

$$T_{min} = T_3 = (5 \text{ à } 10)(q_{ch} + q_b)I_r \quad (IV.13)$$

Où

q_{ch} : la masse métrique de la charge (kg/m)

q_b : la masse métrique de la bande (kg/m)

Les coefficients 5 et 10 tiennent compte des conditions d'utilisation des convoyeurs, respectivement en mine et en carrières.

Ainsi d'après la théorie d'EULER on obtient le facteur de traction réel « a » pour le convoyeur considéré.

$$a = \frac{T_{ent}}{T_{sort}} = \frac{T_4}{T_1} = \frac{T_{adm}}{T_{sort}} \quad (IV.14)$$

La tension admissible étant connue, on passe à la détermination de la tension à la sortie qui n'est autre que la tension au point 1, (T_1).[58]

En utilisant la méthode de contournement d'après laquelle

$$T_i = T_{i-1} + W_{i \rightarrow i-1} \quad (IV.15)$$

On aura :

$$T_2 = T_1 + W_{2-1} \rightarrow T_1 = T_2 - W_{2-1} \quad (IV.16)$$

Analogiquement pour le brin porteur :

$$T_4 = T_{adm} = T_3 + W_{4-3} \quad (IV.17)$$

$$T_3 = T_{min} = T_4 - W_{4-3} \quad (IV.18)$$

L'équation (IV.18) représente l'équation de rupture de la bande sur le brin chargé [9].

$$W_{2-1} = W_{vide} = w_v \cdot L \quad (IV.19)$$

$$W_{4-3} = W_{ch} = w_{ch} \cdot L \quad (IV.20)$$

Où W_{2-1} et W_{4-3} : représentent respectivement les résistances au mouvement des brins, vide et

Chargé (daN)

ω_v et ω_{ch} : les résistances spécifiques au mouvement correspondantes (daN/m)

De l'équation (2.25), on tire la longueur admissible du convoyeur (L_{adm})

$$L_{adm} = \frac{T_{adm} - T_{min}}{W_{ch}} \quad (IV.21)$$

En plus de cela il faut tenir compte de la différence des tensions aux points 2 et 3 exprimée par le coefficient K, qui tient compte des résistances au mouvement de la bande sur le tambour de renvoi (entre les points 2 et 3).

$$T_2 = \frac{T_3}{K} = \frac{T_{min}}{K} \quad (IV.22)$$

La tension à la sortie sera :

$$T_{sort} = T_1 = \frac{T_{min}}{K} - \frac{T_{adm} - T_{min}}{W_{ch}} W_v \quad (IV.23)$$

En définitif nous avons le modèle mathématique du facteur de traction réel:

$$a = \frac{T_{adm} \omega_{ch} K}{T_{min} (\omega_{ch} + K \omega_v) - K \omega_v T_{adm}} \quad (IV.24)$$

De là on remarque que tous les paramètres dans cette formule sont constants excepté les résistances spécifiques au mouvement ω_v et ω_{ch} qui sont fonction de la masse métrique de la bande, de la charge, des rouleaux et de l'angle d'inclinaison du convoyeur [59].

D'après [60] on exprime les résistances spécifiques au mouvement comme suit :

$$\omega_v = q_b [(C_2 W \cos \beta \pm \sin \beta) + C_2 W q_r'] \quad (IV.25)$$

$$\omega_{ch} = (q_b + q_{ch}) [(C_2 W \cos \beta \pm \sin \beta) + C_2 W q_r'] \quad (IV.26)$$

Où

q_r' et q_r'' : respectivement les masses métriques des rouleaux supérieur et inférieur (kg/m)

C_2 : coefficient qui tient compte des résistances locales ayant lieu dans n'importe quel point du convoyeur (point de chargement, tambour de contrainte, dispositif de nettoyage ...).

Le coefficient W met en évidence la résistance au mouvement du brin du convoyeur [60].

Il varie de 0,02 à 0,05 pour les convoyeurs stationnaires, et de 0,1 pour les convoyeurs mobiles.

Dans les équations (IV.25) et (IV.26) on utilise le signe (+) pour le brin ascendant, et le signe (-) pour le brin descendant. De là on déduit que la variabilité des résistances spécifiques au mouvement est liée essentiellement avec la variation de la charge du convoyeur, et son angle d'inclinaison β ; quant aux autres paramètres (q_r' , q_r'' , C_2 , $W...$) ils dépendent uniquement de sa construction.

Avec le changement de l'angle d'inclinaison, nous avons la variation de l'effet de la pesanteur sur les masses mobiles (charge, bande...), ce qui nous donne directement le taux d'utilisation du facteur de traction du convoyeur.

Pour mettre en relief toutes ces hypothèses on considère un convoyeur ayant une charge nominale et un angle d'inclinaison variable (dans notre cas $\beta = 0$ à 18°), une force admissible de rupture de la bande $T_{adm} = 360$ daN (sur une bande à fil d'acier RTL-400), et un effort minimal $T_{min} = 65$ daN

Après un calcul (à partir des formules IV.24, IV.25 et IV.26), on trace la courbe de variation du facteur de traction réel « a » en fonction de l'angle d'inclinaison β du convoyeur, $a = f(\beta)$.

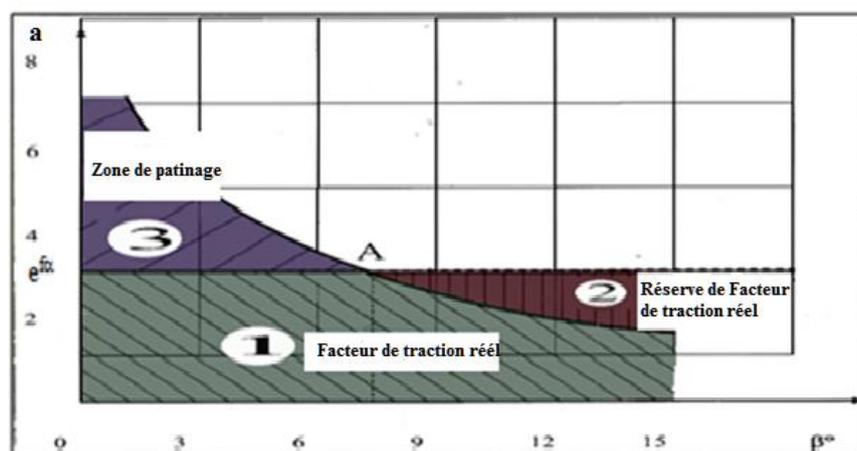


Figure IV.3 Mise en évidence du facteur de traction

La zone (1) : le domaine de réalisation du facteur de traction

La zone (2) : le domaine de réserve de traction

La zone (3) : le domaine d'existence des possibilités de patinage

L'intersection (A) : le Facteur de traction maximum réalisé

De la courbe (figure IV.3) on peut déduire que le point d'intersection entre le facteur de traction réalisé « a » et celui dépendant de la construction $e^{\mu\alpha}$, correspond à une utilisation idéale des propriétés d'adhérence de la bande sur le tambour.

A gauche du point A, c'est le domaine de l'utilisation complète du facteur de traction, domaine qui est limité par les propriétés de la construction, les risques de patinage à ce niveau sont considérables.

Par contre dans la zone qui se trouve à droite de ce point la limite est due aux propriétés d'adhérence du système, dont l'effet de la pesanteur sur le déplacement de la charge à transporter est très important, les risques de patinage dans ce cas sont exclus.

IV .4 Simulation du modèle mathématique

Trois essais ont été effectués sur deux convoyeurs à bande différents, pour valider le modèle développé en utilisant la simulation par ordinateur.

La variation du facteur de traction dans les conditions réelles est observée avec une tension de la bande ($T_{perm} = T_{max}$) pour deux convoyeurs à bande. Un programme de calcul du facteur de traction est programmé en fonction de l'inclinaison des convoyeurs.

Les principaux éléments de ce programme sont les équations de résistances spécifiques du brin inférieur (vide) et du brin supérieur (chargé) dans lesquelles l'effet de β sur le facteur de traction réel (a) est introduit et considéré comme l'élément le plus important.

Ce programme permet d'obtenir des courbes de facteur de traction par rapport à l'angle d'inclinaison avec possibilité de faire varier la tension minimale, la charge et les deux simultanément afin de simuler les conditions de travail réelles du convoyeur.

Le programme développé peut être appliqué pour n'importe quel type de convoyeur dans n'importe quelles conditions pour tester le convoyeur et afin d'améliorer son efficacité sans risque d'endommager n'importe quel élément du système (rupture de la bande, surchauffe du moteur).

Ce programme peut également être appliqué pour trouver le facteur de traction réel de n'importe quel système indépendamment du nombre de convoyeur à bande.

Deux systèmes de transport à bande ont été pris en tant qu'étude de cas avec les paramètres illustrés dans les tableaux 1 et 2 présentés ci-dessous.

Tableau IV.1 Caractéristiques des convoyeurs à bande

N°	largeur de la bande m	facteur de sécurité	Production m ³ /min	Production calculée t/h	la distance Maximal de transport m	vitesse de la bande m/s	Puissance maximale du moteur KW	Nombre du tambour moteur	Tension admissible de la bande Kg	Masse métrique de la bande q _b Kg/m
1	1000	4	13,7	500	1140	2	500	1	13000	16
2	1200	4	25	1200	2300	2,5	500	2	18000	30

Tableau IV.2 Paramètres des convoyeurs obtenus par calcul

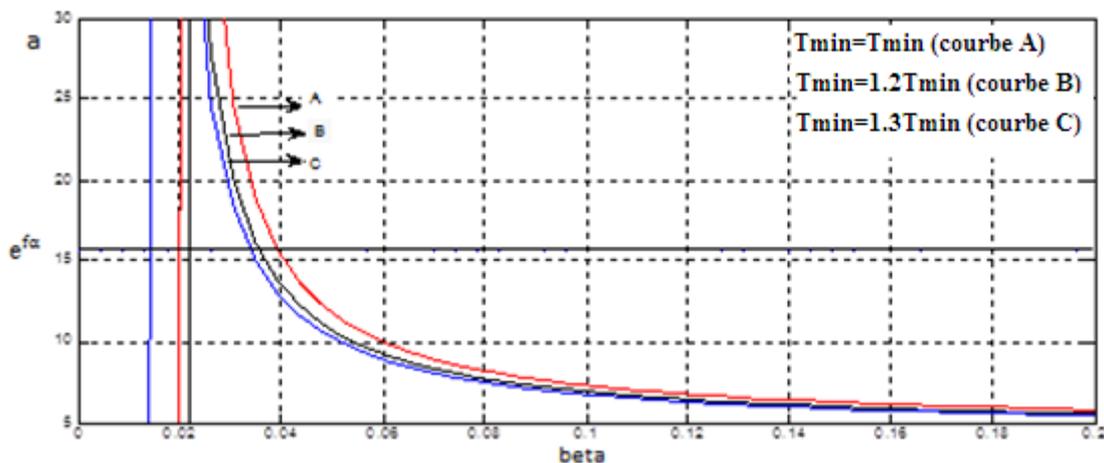
N°	la masse métrique de la Charge q _{ch} Kg/m	Tension minimale de la bande T _{min} , daN	Masse métrique des rouleaux supérieurs q' _r Kg/m	Masse métrique des rouleaux inférieurs q'' _r Kg/m
1	69,44	512,64	24	7,33
2	133,33	979,98	27,06	8,26

IV.5 Résultats de l'expérience

Des essais ont été effectués sur trois modes opératoires différents, comme illustré dans les courbes ci-dessous.

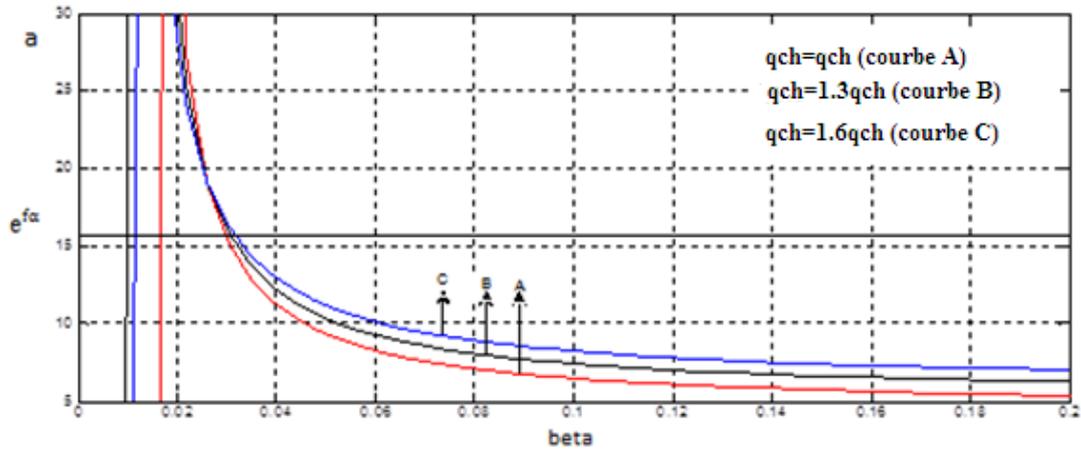
IV.5.1 Résultats desessais sur le premier convoyeur à bande

- *Variation de la tension minimale*



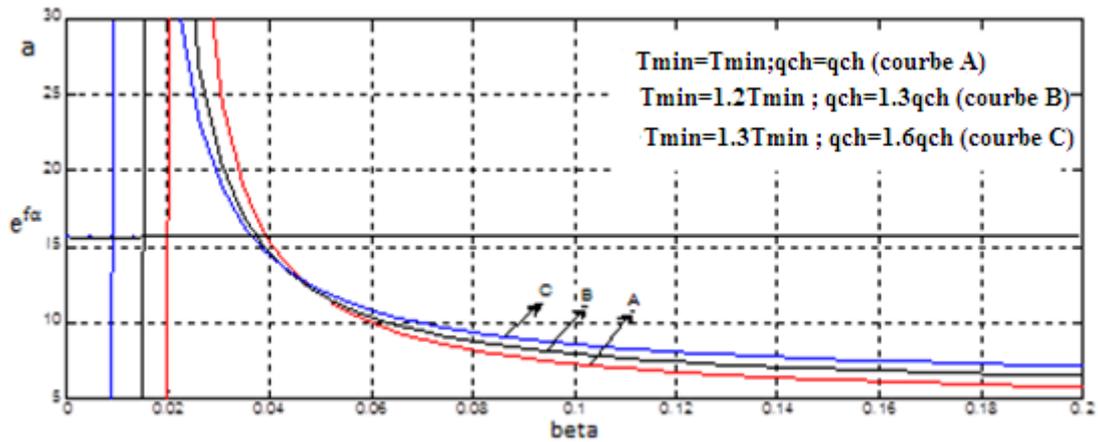
FigureIV.4. (a) Courbes obtenues avec la variation de la tension minimale

• *Variation de la charge*



FigureIV.4. (b) Courbes obtenues avec la variation de la charge

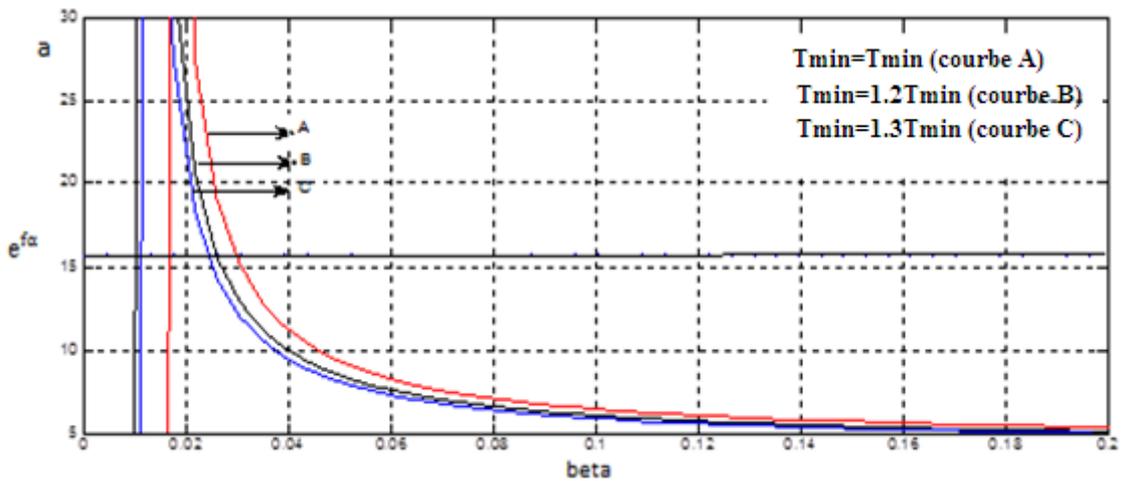
• *Variation à la fois de la tension minimale (de sortie) et de la charge*



FigureIV.4. (C) Courbes obtenues avec la variation simultanée de la charge et de la tension

IV.5.2 Résultats desessaisur le deuxième convoyeur à bande

• *Variation de la tension minimale*



FigureIV.5. (a) Courbes obtenues avec la variation de la tension minimale

- **Variation de la charge**

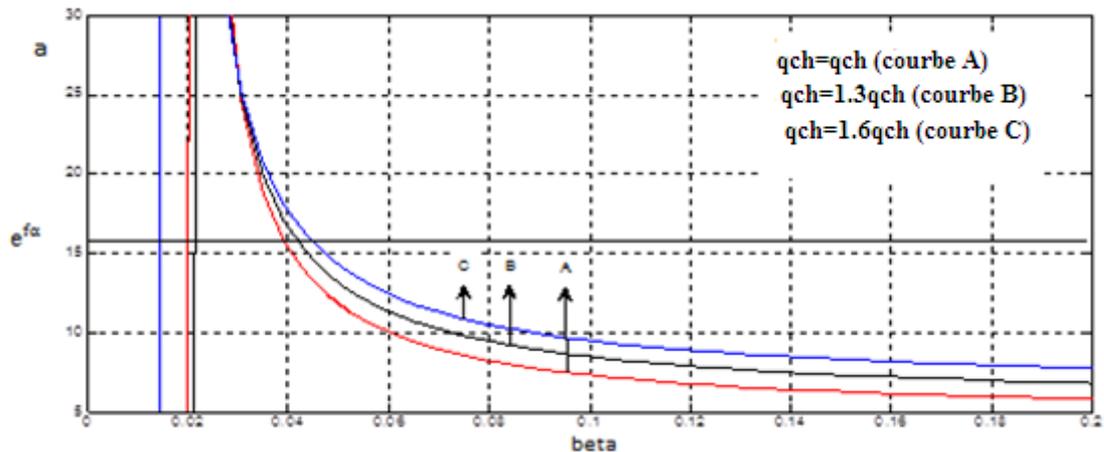


Figure IV.5. (b) Courbes obtenues avec la variation de la charge

- **Variation à la fois de la tension minimale (de sortie) et de la charge**

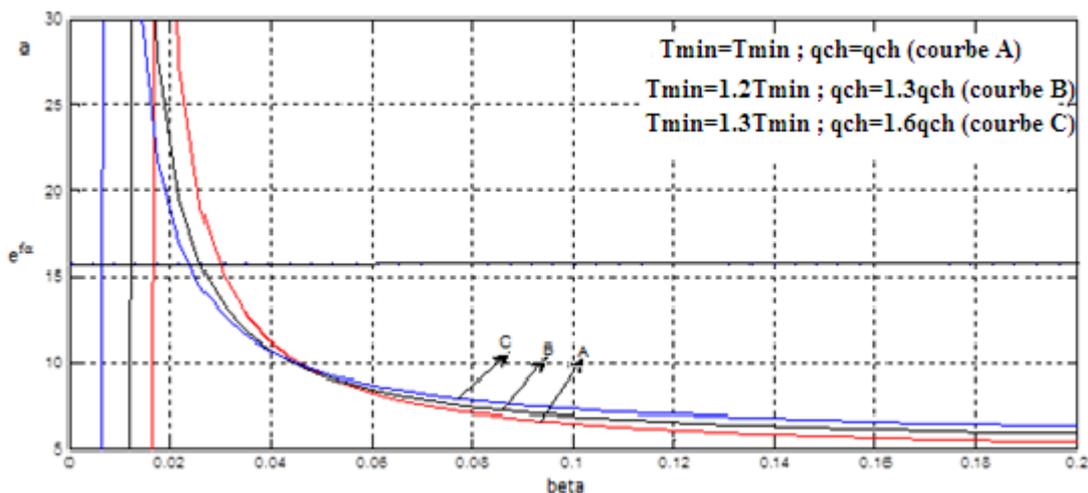


Figure IV.5. (C) Courbes obtenues avec la variation simultanée de la charge et de la tension

IV.6 Discussion des résultats de l'expérience

- **Variation de la tension minimale**

Au fur et mesure qu'on augmente la tension minimale (de sortie) on observe et ceci est valable pour les deux essais semblables une diminution de la zone où il y a un risque de glissement figure IV.4. (a) et figure IV.5. (a), avec une possibilité de rupture de la bande. Par conséquent, l'augmentation de la tension minimale (de sortie) des convoyeurs a entraîné une augmentation significative de la zone des réserves des forces de traction.

La diminution de la zone de risque de glissement est due à la diminution des amplitudes dynamiques qui sont la principale cause de fatigue (usure et rupture de la bande).

En règle générale, lorsque la tension minimale (à la sortie) au niveau des poulies d'entraînement des convoyeurs à bande augmente, l'équilibre entre l'aire du facteur de traction réelle et celle du facteur de traction de conception est atteint.

En augmentant de 20% la tension à la sortie de la poulie d'entraînement du premier convoyeur, des amplitudes dynamiques plus importantes avec un risque de glissement plus élevé apparaîtront sur le convoyeur 1 car la tension admissible du convoyeur 2 est plus grande.

Les risques de patinage existent toujours sur le convoyeur 1 en revanche ; ils ont diminués d'une manière significative sur le convoyeur 2.

On peut en conclure que l'augmentation de la tension de sortie affecte essentiellement le risque de glissement lorsqu'une réduction substantielle est constatée, son influence sur les réserves consommées restant significative mais à un niveau acceptable.

- ***Variation de la charge***

Dans la deuxième série de tests, la charge varie et la tension minimale (sortie) est maintenue constante figure.4.b et figure.5.b.

Lorsqu'on charge les convoyeurs on constate une légère augmentation de la surface des réserves du facteur de traction réelle qui est suivie d'une diminution de la surface représentant le facteur de traction de construction $e^{f\alpha}$ par le convoyeur.

Ainsi, une amélioration de l'efficacité de la machine par l'optimisation de la charge suivie d'une légère réduction du risque de glissade et de rupture de la courroie est observée dans les deux cas.

Le convoyeur 2 a une meilleure réponse à l'augmentation de la charge car sa tension admissible de courroie est plus élevée.

- ***Variation à la fois de la tension minimale (de sortie) et de la charge***

Dans le test final, la tension minimale et la charge sont augmentées simultanément figure.4.c et figure.5.c. L'augmentation progressive de ces deux paramètres a pour objectif principal d'améliorer les limites d'exploitation de la machine (amélioration de la production) et de consommer les limites d'élasticité de la courroie.

Les résultats obtenus permettent de tirer les conclusions suivantes :

- ✓ Augmenter le degré de facteur de traction réel
- ✓ Une réduction graduelle de la zone de glissement dans les deux convoyeurs à bande et une réduction important dans le deuxième convoyeur à cause de la valeur élevée de la tension admissible.

- ✓ Le processus physique est respecté lorsqu'il agit sur une charge et une tension minimale, mais il est impossible d'augmenter la charge au-delà d'une certaine limite car tous les paramètres dépendent de la conception de la machine, des dimensions de la courroie et de la puissance du moteur.

IV.7 Conclusion

Au début de ce chapitre, nous avons considéré le principe d'entraînement habituel basé sur l'adhérence entre courroie et un ou plusieurs tambours moteurs.

A partir de l'analyse physique du facteur de traction nous déduisons l'existence d'un facteur qui dépend uniquement de la construction dénommé e^{α} par contre au cours de son exploitation il développe un facteur de traction réel (α) qui dépendra essentiellement des conditions endogènes et exogènes, dans lesquelles le convoyeur évolue (dénivelé ; conditions climatiques ; fluctuation de la charge ; qualité de la charge;...) .Ce facteur reflète la réalisation des capacités de traction dans les conditions concrètes, ce qui nous a permis par la suite de suivre et de mettre en évidence les réserves des forces d'adhérence.

Cette approche nous permet une surveillance de l'exploitation de la machine et avoir un diagnostic rigoureux permettant la réduction du glissement, et par la même l'amélioration des performances du convoyeur à bande.

En contrôlant la relation proportionnelle du rapport entre les limites d'élasticité de la bande (T_{adm}); de la charge, et la tension à la sortie de la tête motrice (T_{min}) nous pouvons puiser dans les réserves de traction du convoyeur pour optimiser à la fois le rendement et la surveillance et le diagnostic.

Le modèle mathématique développé du facteur de traction du convoyeur à bande est un outil important pour le contrôle et la surveillance du fonctionnement de la machine dans diverses conditions liées à son exploitation ou aux capacités élastiques de la bande et à la rigidité de ses éléments de travail.

L'augmentation de la tension minimale permet à la machine de fonctionner sans risque de glissement .toute augmentation de la charge dans les limites d'élasticité de la bande augment la zone d'utilisation des propriétés d'adhérence et améliorer l'efficacité de la machine et la production de l'entreprise, mais la charge reste tout de même limitée par la conception de la machine et la puissance du moteur.

Il est nécessaire d'adopter un moyen permettant la variation et le contrôle simultanés de la tension et la charge du convoyeur afin de réduire les risques de glissement, d'empêcher les pannes et d'augmenter considérablement les capacités de traction par le choix d'une commande adaptée.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Le convoyeur à bande tient une place très importante dans le monde industriel d'aujourd'hui grâce à sa robustesse de construction. Actuellement, la structure complexe intéresse aussi bien le monde de la recherche que celui de l'industrie car, bien que plus coûteuse, elle présente plus de fiabilité de maintenance des produits solides en vrac, et offre plus d'options pour la réalisation d'une technique tolérante des surveillances et diagnostiques.

Le travail que nous avons présenté dans cette thèse, a amené une contribution à la surveillance et le diagnostic des convoyeurs à bande

Le chapitre I présente l'architecture et les concepts des convoyeurs à bande. Plus particulièrement, le système de convoyeur par bande transporteuse qui est utilisé principalement pour assurer le déplacement des matériaux solides en vrac à un point d'une autre, d'une manière continue. Également, les différents composants et leurs dénominations et dimensions sont présentés en détails et sous forme de figures, ainsi que les différents types de produit transporté

Le chapitre II nous a permis de situer l'importance de contrôle de la vitesse des convoyeurs à bande pendant les processus transitoires, et les risques provenant dans ces processus et son influence sur les performances des convoyeurs à bande dans la logique industrielle actuelle dominée par la recherche permanente de l'amélioration des systèmes de production.

Dans le chapitre III nous nous intéressons à l'étude des systèmes tolérants de surveillance et le diagnostic aux défauts des convoyeurs à bande. Dans la première partie, nous déterminons la fiabilité des systèmes de convoyeur à bande, nous avons proposé une classification des méthodes de diagnostic concernant le convoyeur à bande. En deuxième partie, une stratégie de surveillance intelligente avec les différents objets et techniques sont présentés. En dernière partie de ce chapitre concernant les modes d'inspections des convoyeurs à bande et les différentes opérations de la maintenance associée.

Le chapitre IV est dédié à la modélisation et le diagnostic des systèmes de convoyeur à bande plus particulièrement le facteur de traction réel. La modélisation est présentée à travers trois étapes différentes.

La première est celle basée sur un modèle structurel par des équations mathématiques d'état du système à partir de la théorie de la transmission de l'effort de traction par tambour moteur, à base de cette théorie nous pouvons déterminer le facteur de traction possible à réaliser pour les convoyeurs à bande, que l'on compare par la suite avec le facteur d'après la

construction $e^{\mu\alpha}$, nous pouvons représenter le système par un graphe orienté représentant la structure du système et le principe d'entraînement par frottement du convoyeur à bande, la base du calcul est l'intégration des forces de frottement autour de tambour d'entraînement.

La deuxième étape est basée sur la simulation par ordinateur par l'utilisation combinée du modèle et des données, des tests expérimentaux ont été réalisés pour valider le modèle développé en utilisant la simulation par ordinateur.

La troisième étape est de représenter le système sous forme d'un graphe de causalité à travers de la variation du facteur de traction dans les conditions réelles est observée avec la rupture totale de la bande ($T_{perm} = T_{max}$) pour deux convoyeurs à bande. Un programme de calcul du facteur de traction est programmé en fonction de l'inclinaison des convoyeurs.

Les méthodes et algorithmes proposés dans cette thèse peuvent être adaptés à plusieurs applications dont l'amélioration de la sûreté de fonctionnement. Cette dernière représente un aspect pouvant améliorer les performances du système de convoyeur à bande et limiter les pertes économiques.

Pour conclure, nous estimons que la surveillance, le diagnostic et la tolérance aux défauts sont des outils importants, nécessaires et très utiles dans le domaine de la surveillance des systèmes des convoyeurs à bande à grande dimension. Ils assurent aux utilisateurs du système de production une continuité et qualité de service rendant un système robuste en présence d'un défaut.

Perspectives liées à ces travaux ;

- Développement de modèle de commande adaptée
- Intégration des conditions climatiques dans la gestion des commande pour contrôler le couple ; la vitesse de la bande et du tambour
- Développement de la recherche pour augmenter les capacités élastique de la bande
- Améliorer les garnissages des tambours moteurs dans le but d'augmenter l'adhérence

Bibliographie

- [1] *Daijie He* «*Energy saving for belt conveyors by speed control*» these doctorat ,université delft, chine 2017
- [2] *Ali Belhamra* «*Amélioration des Conditions d'Exploitation des Convoyeurs à Bande* » thèse doctorat, Université Badji Mokhtar – Annaba 2007
- [3] *Ashley Jan George NUTTALL* «*Design Aspects of Multiple Driven Belt Conveyors* » These doctorat, université delft, china 2007
- [4] *Meziane Ridha, Mouhli Toufik* «*Etude Mécanique et électrique d'un convoyeur à bande afin d'augmenter sa charge* », université Béjaïa, 2013
- [5] *Daijie He, Yusong Pang, Gabriel Lodewijks* «*Speed control of belt conveyors during transient operation*» p(622-631) *Powder technology*, elsivier, 2016
- [6] *Gabriel Lodewidjks* «*Dynamics of beltsystems* » thèse doctorat, université delft, chine 1996
- [7] *Daniel Roessner* «*Contribution à l'étude du comportement mécanique des carcasses textiles de bandes transporteuses : optimisation de la jonction* » thèse de doctorat, université de haute alsace, 2010
- [8] *Daijie He, Yusong Pang, and Gabriel Lodewijks* «*Determination of Acceleration for Belt Conveyor Speed Control in Transient Operation*» *International Journal of Engineering and Technology*, Vol. 8, No. 3, March 2016
- [9] *Stanislav Gramblicka, Robert Kohar, Marian Stopka* «*Dynamic analysis of mechanical conveyor drive system*», *International scientific conference on sustainable, modern and safe transport* , *Procedia Engineering* 192 (2017) 259 – 264, Slovakia
- [10] *Yusong Pang*, «*Intelligent Belt Conveyor Monitoring and Control*», these doctorat, universities delft, china, 2010
- [11] *Daijie He, Yusong Pang, Gabriel Lodewijks* «*Belt Conveyor Dynamics in Transient Operation for Speed Control*» *international Journal of Civil and Environmental Engineering*, Vol: 10, No: 7, 2016
- [12] *Informations Technique* «*paramètres à prendre en compte pour l'étude et la conception des convoyeurs à bande*», <https://www.yumpu.com/fr/document/view/17207122/informations-techniques-rulmeca>
- [13] *Sébastien Charlemagne* «*Modélisation et commande d'un système de transport de bande textile*» thèse doctorat, université de Lille, France 2003
- [14] *You-fu H, Meng Q.* «*Dynamic characteristics of conveyor belts*», *Journal of china University of Mining and Technology*, Elsevier, Vol 18, 0629–0633, 2008
- [15] *Nuttall A.J.G, Lodewijks G.* «*Traction versus slip in a wheel-driven belt conveyor*», *Mechanism and Machine Theory*, Elsevier, Vol 41, 1336–1345, 2006

- [16] Daniel Clénet, Jan, «Optimizing energy efficiency of conveyors», these doctorat, 2010
- [17] Hiltermann, J., Jul. 2008. *Reducing the electrical power consumption of troughed belt conveyor by speed control*. Masters Thesis, Delft University of Technology, Delft, the Netherlands.
- [18] Goto, K., Yogo, K., Higashii, T., Nov. 2013. *A review of efficiency penalty in a coal-fired power plant with post-combustion CO₂ capture*. *Applied Energy* 111, pp. 710–720.
- [19] Lodewijks, G., Pang, Y., 2013. *Energy saving options for continuous transport systems, an exploration* pp. 214–217.
- [20] Graaf, M. d., Jan. 2013. *Viability study of an energy-recovery system for belt conveyors*. Research assignment 2013. TEL.7747, Delft University of Technology, Delft.
- [21] Daus, W., Koerber, S., Becker, N., 1998. *Raw coal loading and belt conveyor system at Nochten Opencast Mine- A new conveying and loading system based on drives controlled and adjusted by frequency converter*. *BRAUNKOHL* 50 (2), pp. 117–130.
- [22] Lodewijks, G., 2011. *The next generation low loss conveyor belts*. *Bulk Solids Handling* 32, pp. 52–56.
- [23] Anonymity, 2016. *Speed control of DC motor*. URL <http://www.electrical4u.com/speed-control-of-dc-motor/>
- [24] Nave, M., 1996. *A comparison of soft start mechanisms for mining belt conveyors*. Tech. rep. Intertec Presentations, Inc., Englewood, CO (United States).
- [25] Al-Sharif, L., 2007. *Intelligent braking systems for public service escalators*. *Elevator World* 55 (1), p. 122.
- [26] Lodewijks, G., Pang, Y., 2013a. *The application of flywheels on belt conveyors*. *Beltcon* 17, pp. 1–10.
- [27] Pang, Y., Lodewijks, G., 2011. *Improving energy efficiency in material transport systems by fuzzy speed control*. *IEEE*, pp. 159–164.
- [28] Kolonja, B., Jeftenić, B., Ignjatović, D., 2003. *The application of frequency converters for the regulation of belt conveyor drives in surface mining*. *Transport i logistika* (5), pp. 11–26.
- [29] Daiji, H., Yosong, P., Lodewijks, G. «Speed control of belt conveyors during transient operation», *powder Technology*, Elsevier, Vol. 301, 622–631, 2016.
- [30] Nordell, L., 1998. *Improving belt conveyor efficiencies: power, strength and life*. URL <http://www.ckit.co.za/secure/conveyor/papers/troughed/improving/improving.htm>
- [31] Shirong Z, Xiaohua X. «Optimal control of operation efficiency of belt conveyor systems», *Applied Energy*, Elsevier, Vol 87, 1929–1937, 2010

- [32] Shirong Z, Xiaohua X. «modeling and energy efficiency optimization of belt conveyors», *Applied Energy*, Elsevier, Vol. 88, 3061–3071, 2011
- [33] Michel Batteux, «Diagnosticabilité et diagnostic de systèmes technologiques pilotés» thèse doctorat, université Paris-Sud11, France 2016
- [34] Pauline Ribot, «Vers l'intégration diagnostic /pronostic pour la maintenance des systèmes complexes», thèse doctorat, université de Toulouse, France 2009
- [35] Abdallah Kabouche, «Technique de maintenance prédictive pour l'amélioration de la disponibilité des installations», thèse doctorat, université Annaba, Algérie
- [36] Seghiour Abdellatif «Diagnostic des machines électrique par l'analyse du champ magnétique-application à l'identification des défauts», thèse doctorat, université Laghouat, Algérie 2017
- [37] Faiza Kamoun Charfi «Surveillance des systèmes électroniques de puissance embarqués dans le véhicule électrique-Méthodes et outils-» thèse doctorat, l'école nationale d'ingénieurs de Sfax, Tunis 2004
- [38] Gabriel Antonio Pérez Castanda «Evaluation par simulation de la sûreté de fonctionnement de systèmes en contexte dynamique hybride », thèse doctorat, université Nancy, France 2009
- [39] Bouchareb Ilhem «Modélisations et outils d'aide au diagnostic de défauts de machines synchrones et a reluctance variable», thèse doctorat, université Constantine, Algérie 2013
- [40] Audine Subais «Contribution au diagnostic des systèmes complexes», thèse doctorat, université Toulouse, France 2007
- [41] Halem Noura «Modélisation des Machines Asynchrones Triphasées à Cage en Vue du Diagnostic par la Méthode des Eléments Finis», thèse doctorat, université Beskra, 2015
- [42] Belhamdi Saad «Diagnostic des défauts de la machine asynchrone contrôlée par différents techniques de commande », thèse doctorat, université Beskra, Algérie 2014
- [43] Medoued Ammar, «surveillance et diagnostic des defaults des machines électriques : applications aux moteurs asynchrones» thèse doctorat université Skikda, Algérie 2012
- [44] Alles, R. and Wach, T. *Method for monitoring a conveyor belt and system therefore*, 2000
- [45] Lodewijks, G. and Ottjes, J.A. *Intelligent belt conveyor monitoring and control: Theory and applications. In Proceedings of the International Materials Handling Conference (Beltcon) 13, Johannesburg, South Africa, 2005a.*

- [46] Paul, J. and Shortt, G. Investigation of maximum belt speed of idlers. In *Proceedings of the International Materials Handling Conference (Beltcon) 14, Johannesburg, South Africa, 2007*.
- [47] Lodewijks, G. and Ottjes, J.A. Application of Fuzzy Logic in belt conveyor monitoring and control. In *Proceedings of the International Materials Handling Conference (Beltcon) 13, Johannesburg, South Africa, 2005b*.
- [48] O'Connor, P.D.T. *Practical reliability engineering*. John Wiley & Sons Ltd., Chichester, 3rd ed. edition, 1991. ISBN 0471926965.
- [49] Pang, Y. *Intelligent belt conveyor monitoring and control*. Phd thesis, Delft University of Technology, 2010.
- [50] Pang, Y. and Lodewijks, G. Agent-based intelligent monitoring in large-scale continuous material transport. In *Proceedings of the 9th IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control*, pages 79–84, Beijing, China, 2012
- [51] Harrison, A. *Dynamic measurement and analysis of steel cord conveyor belts*. Phd thesis, The University of Newcastle, 1984.
- [52] Harrison, A. and Brown, B.C. Monitoring system for steel-reinforced conveyor belts. *Journal of Engineering for Industry*, 108(2):148–153, 1986. doi: DOI:10.1115/1.3187050
- [53] Alport, M., Govende, P., Plumb, S., and van der Merwe, L. Identification of conveyor belt splices and damages using Neural Networks. In *Proceedings of the International Materials Handling Conference (Beltcon) 11, Johannesburg, South Africa, 2001*.
- [54] Alles, R. and Wach, T. *Method for monitoring a conveyor belt and system therefore*, 2000.
- [55] Bartelmus, W. Mathematical modelling and computer simulations as an aid to gearbox diagnostics. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 15(5):855–871, 2001. doi: 10.1006/mssp.2001.1411.
- [56] LIU, Xiangwei, “Prediction of Belt Conveyor Idler Performance” , These Master of Science in Mechanical Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan, China, 2016
- [57] Vayeron Pty Ltd. *Smart-Idler*, 2013. URL <http://www.vayeron.com.au/>.
- [58] Euler, M. L., 1762. *Remarques sur l'effect du frottement dans l'equilibre*. *Mem. Acad. Sci* 18, pp. 265–278.
- [59] Entelwein, F., 1832. *Handbuch der statik Fester korper...* G. Reimer.
- [60] Attaway, S. W., 1999. *The mechanics of friction in rope rescue*. pp. 1–16.
- [61] Nel, P., Shortt, G., 1999. Controlling belt slip. *Bulk Solids Handling* 19 (4), pp. 481–486.