



Université Sidi Mohammed Ben Abdellah Fès

Faculté de Sciences et techniques de Fès-Sais

Département de génie mécanique



Mémoire de projet de fin d'étude pour l'obtention de la

Licence Sciences et Techniques

Spécialité : Conception et Analyse Mécanique

Thème :

**Résolution du problème de cisaillement des agitateurs au
niveau de la cuve de digestion**

Lieu :

Effectué au sein de l'unité JFC V Maroc Phosphore du groupe OCP

Présenté par :

- JTITE Safae
- SADIK Soukaina

Encadré par :

- Mr. A. SEDDOUKI (FST)
- Mr. D. EL ADAMI (OCP)

Soutenu le 17/06/2015 devant le jury :

- Pr. A. SEDDOUKI
- Pr. B. HARRAS

Sommaire

Liste des abréviations	4
Listes des figures.....	4
Listes des tableaux.....	5
Remerciement.....	6
Avant propos	7
Introduction générale.....	8
Chapitre I :.....	9
Présentation de l'organisme d'accueil.....	9
I. Présentation du groupe OCP	10
I.1. Fiche d'identité	10
II.1. Mission du groupe OCP.....	10
I.3.1. Situation géographique.....	11
I.3.2. Présentation organisationnelle	11
I.3.3. Potentiel installé.....	12
II. Présentation de JFCV	13
II.1. Atelier Sulfurique	13
II.2. Atelier Phosphorique	14
II.2.1. définition de l'acide phosphorique	14
II.2.2. Installations.....	14
II.2.3. Procédé de fabrication de l'acide phosphorique	14
II.3. Atelier des engrais	20
III. Conclusion.....	20
Chapitre II: Position du problème	21
I. Les Agitateurs de la cuve de digestion.....	22
I.1. Introduction.....	23
I.2. Définition de l'agitation	23
I.3. Description des agitateurs	23
I.4. Système d'agitation pour section de cuve de digestion.....	24
I.5. Description détaillée des équipements	24
I.6. Maintenance d'agitateur (Méthode AMDEC).....	26
I.6.1. Introduction.....	26
I.6.2. Définition de la maintenance	26
I.6.3. Typologie de la maintenance	26

I.6.4. L'étude AMDEC	27
I.6.5. Démarche pour l'élaboration du plan AMDEC	29
II .Problèmes liés aux agitateurs.....	33
II.1. La soudure	33
II.2. TTAS après soudage.....	35
II.2.1. Matériau de construction	35
II.2.2 Soudage d'UB6.....	36
II.2.3 les zones de soudage	37
II.2.4 Traitement de revenu	39
II.2.5 L'hypertrempe	39
II.2.6. Détensionnement des contraintes.....	40
II.3. Influence du couple résistant	41
II.3.1. Calcul du couple résistant	41
II.3.2. Calcul du couple moteur	42
II.3.3.Les solutions proposées	42
Conclusion.....	48
Bibliographies	49

Liste des abréviations

OCP	: Office chérifien du phosphate
JFC V	: Jorf Fertilizer Company
TED	: Traitement des eaux douces
GTA	: Groupe turbo alternateur
CTE	: Centrale thermoélectrique
RME	: Une station de reprise d'eau de mer
ND	: Non-détection
TTAS	: Traitement thermique après soudage
G	: Indice de gravité
F	: Indice de fréquence
TS	: Taux de solide

Listes des figures

Figure 1: Vue satellitaire du site.....	11
Figure 2: L'ensemble industriel à Jorf Lasfar	12
Figure 3: Schéma des entrées et sorties des ateliers	13
Figure 4: Etapes de production de l'acide phosphorique	15
Figure 5: Attaque-Filtration.....	16
Figure 6: Réacteur d'attaque et cuve de digestion	17
Figure 7: Section de filtration.....	18
Figure 8: Ligne de concentration de l'acide 29%	19
Figure 9: Agitateur	22
Figure 10: les pales de l'agitateur	25
Figure 11: Analyse qualitative des défaillances	30
Figure 12: Arbre après renforcement	34
Figure 13: Les zones observées lors du soudage.....	38

Listes des tableaux

Tableau 1: Grille AMDEC	33
Tableau 2: Désignations normalisées	35
Tableau 3: Composition chimique d'UB6	35
Tableau 4: les propriétés mécaniques d'UB6.....	36
Tableau 5: Effets du traitement de détensionnement des contraintes résiduelles	40
Tableau 6: Composition chimique de duplex et UB6.....	46
Tableau 7: Normes de référence.....	46
Tableau 8: Propriété physique	46
Tableau 9: Propriété mécanique	47

Remerciement

Avant d'entamer au vif de notre rapport, nous adressons d'abord nos sincères remerciements à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à élaborer cet ouvrage.

On tient en tout premier lieu à exprimer notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à toute l'équipe pédagogique de la faculté des sciences et techniques et les intervenants professionnels responsables de la formation **Conception et Analyse Mécanique**.

Ainsi on tient à exprimer notre profonde gratitude et immense respect à notre encadrant Mr **A.SEDDOUKI**, pour sa disponibilité et son soutien sans faille qui nous a grandement facilité la tâche.

Nos remerciements vont également au membre du jury pour avoir accepté d'évaluer notre travail et nous permettrons de profiter ainsi de leur point de vue précieux.

Toutes nos expressions de reconnaissances et de gratitude sont présentées aux agents de **JFCV**, techniciens et ouvriers pour leur accueil sympathique, leur coopération professionnelle et leur esprit d'équipe, qu'ils nous ont accordés depuis la prise de contact jusqu'à la fin de ce stage.

Avant propos

Le stage dans une industrie, constitue un élément primordial dans la formation de chaque étudiant, parce qu'il lui permet d'améliorer ses connaissances et de lui faire acquérir un important savoir-faire, ainsi apprendre des méthodes techniques de travail, pour lui permettre de prendre contact avec le monde des entreprises, de tester ses possibilités d'adaptation personnelle, mettre ainsi en application toutes les connaissances acquises durant sa formation. Donc pour avoir une formation professionnelle, on doit chercher le complément pratique de la théorie dans le monde du travail.

Une telle occasion nous a été offerte par le groupe OCP différemment d'un stage d'initiation, en nous offrant une expérience incomparable soit au niveau des connaissances théoriques que nous avons acquises pour accomplir notre sujet, soit au niveau du contact pratique à une grande industrie marocaine telle que l'OCP.

Introduction générale

L'entreprise se trouve aujourd'hui, plus que jamais, dans un marché qui exige des contraintes de qualité, de coût et de délai. Afin de réussir cet équilibre, l'entreprise est amenée à éliminer tout gaspillage et mauvaise gestion et à investir de plus en plus dans ses infrastructures. Elle doit ainsi augmenter sa compétitivité et assurer, en même temps, la fiabilité, la maintenabilité et la sécurité, la disponibilité de ses installations.

Dans ce contexte d'amélioration du processus de la maintenance que connaît JFCV, dérive notre projet qui vise à augmenter le taux de disponibilité des agitateurs présent au sein de l'entreprise et étudier ainsi la cause de cisaillement de ces derniers en appliquant des méthodes d'excellence avec rigueur.

Dans ce rapport, nous allons résoudre le problème selon les étapes suivantes :

- Position du problème ;
- Proposition des solutions et choix de celle la plus adéquate ;
- Dimensionnement de la solution choisie ;

Chapitre I :

Présentation

de

l'organisme

d'accueil

I. Présentation du groupe OCP

Leader mondial sur le marché du phosphate et des produits dérivés, et première entreprise du Royaume, le Groupe **OCP** opère sur les cinq continents. Son ouverture traditionnelle sur l'international, depuis sa création en **1920**, le pousse tout naturellement à développer, en permanence, des capacités d'adaptation, de flexibilité et d'anticipation pour pouvoir répondre aux exigences de plus en plus fortes des clients dans un marché très concurrentiel.

I.1. Fiche d'identité

- Date de création de l'OCP: **1920**.
- Date de création du Groupe OCP: **1975**.
- Date de création d'OCP SA: **2007**.
- Réserves de phosphate: **20** milliards de tonnes sur un total mondial de **50** milliards.
- Production : phosphate et dérivés phosphatés (acide phosphorique, engrais).
- Sites de production de Phosphate : Khouribga, Benguéir, Youssoufia, Boucraâ-Laâyoune Dérivés : Safi, Jorf Lasfar.
- Ports d'embarquement : Casablanca, Jorf Lasfar, Safi, Laâyoune.

II.1. Mission du groupe OCP

L'OCP maîtrise toute la chaîne de création de valeur de l'industrie phosphatée : extraction et traitement du minerai, transformation de cette matière première en un produit liquide intermédiaire, l'acide phosphorique, et fabrication des produits finis par concentration et granulation de cet acide ou par purification : engrais, acide phosphorique purifié.

Les principales activités de l'OCP sont :

- La prospection
- La production
- La valorisation
- La commercialisation

I.3. Présentation du site OCP de Jorf Lasfar

I.3.1. Situation géographique

Le site OCP de Jorf Lasfar est situé à 33° 07' latitude Nord et à 8°38' longitude ouest, à 17 km au sud de la ville d'El Jadida et de 110 km de la ville de Casablanca.



Figure 1: Vue satellitaire du site

I.3.2. Présentation organisationnelle

Le site de Jorf Lasfar a été retenu pour l'implantation de cet ensemble industriel, compte tenu des avantages suivants :

- Proximité des zones minières permettant son alimentation en phosphate,
- Existence d'un port à tirant d'eau important,
- Disponibilité de l'eau de mer et d'eau douce,
- Disponibilité de terrains pour les extensions futures.

Cet ensemble qui se situe dans une enceinte s'étendant sur **1800** ha environ permet de produire annuellement **2** millions de tonnes de **P₂O₅**.

I.3.3. Potentiel installé

Le site de Jorf Lasfar comporte



Maroc Phosphore III-IV Jorf Lasfar qui a démarré en 1986

1.7 Mt P_2O_5 ; 3 Mt engrais azotés

EMAPHOS, en partenariat (Belgique) et (Allemagne), qui a démarré en Janvier 1998, pour la production d'acide phosphorique purifié ; **150 000 t P_2O_5 purifié**

IMACID, en partenariat avec le Groupe Birla (Inde) et le Groupe TCL (Inde), qui a démarré en 1999 ; **430 000 t P_2O_5**

PAKPHOS, en partenariat avec Pakistan qui a démarré en 2008

375 000 t P_2O_5

BUNGY, en partenariat avec Brésil qui a démarré en 2009 / 2010, sous le nom de JFCV

375 000 t P_2O_5 ; 610 000 engrais

Figure 2: L'ensemble industriel à Jorf Lasfar

II. Présentation de JFCV

Jorf Fertilizer Company se compose de quatre ateliers :

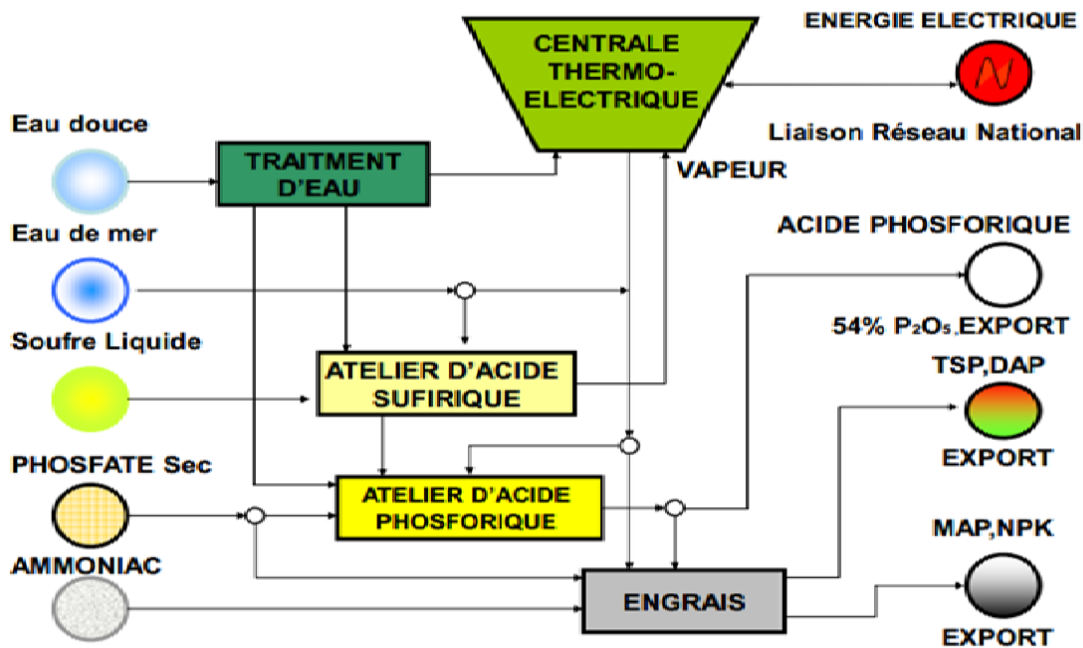


Figure 3: Schéma des entrées et sorties des ateliers

II.1. Atelier Sulfurique

Une unité de production d'acide sulfurique de capacité 1.125.000 tonnes/an.

II.2. Atelier Phosphorique

II.2.1. définition de l'acide phosphorique

L'acide phosphorique, de formule chimique H_3PO_4 , est un acide minéral obtenu par traitement du minerai de phosphate ou par combustion du phosphore.

II.2.2. Installations

Une unité de production d'acide phosphorique de capacité **375.000** tonnes d'acide phosphorique (P_2O_5) par an. Cet atelier est composé des sections suivantes:

- Unité d'épaississement
- Unité attaque-filtration
- Unité de stockage d'acide **29%** P_2O_5
- Unité de concentration dans une boucle sous vide
- Unité de stockage d'acide **54%** P_2O_5

II.2.3. Procédé de fabrication de l'acide phosphorique

La fabrication de l'acide phosphorique passe par plusieurs étapes qui sont montrées dans la figure suivant :

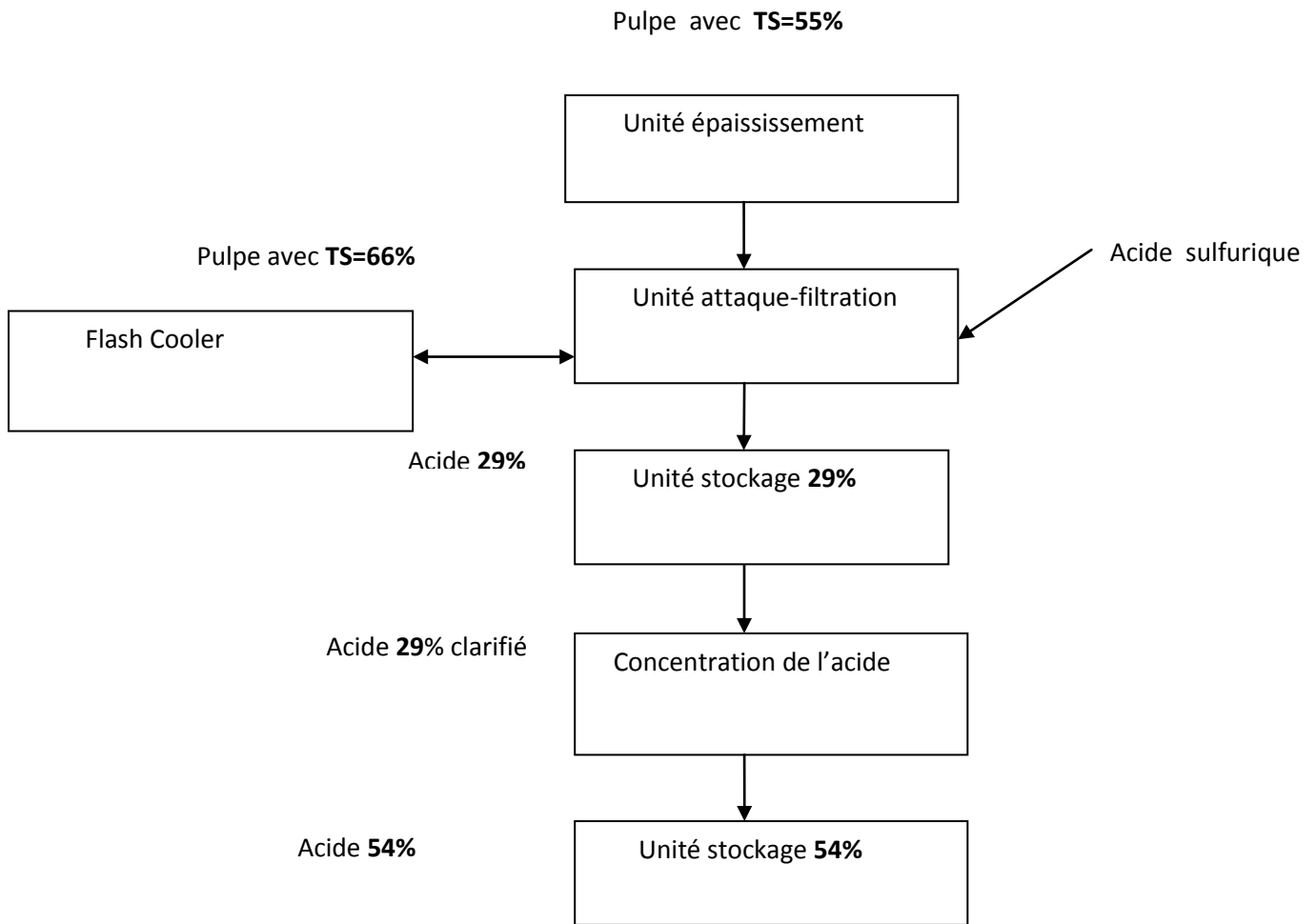


Figure 4: Etapes de production de l'acide phosphorique

✓ **Epaississement :**

L'épaississement a pour rôle d'augmenter le taux de solide de la pulpe de phosphate de 20 à 65%. Il s'effectue dans un bac contenant trois zones avec des solutions de différente densité.

La première zone contient la solution clarifiée à la surface, la deuxième, à mi-hauteur contient une solution de concentration intermédiaire et la troisième est la pulpe épaissie qui sera extraite directement vers la cuve d'attaque où elle sera attaquée par l'acide sulfurique.

✓ **Attaque-Filtration :**

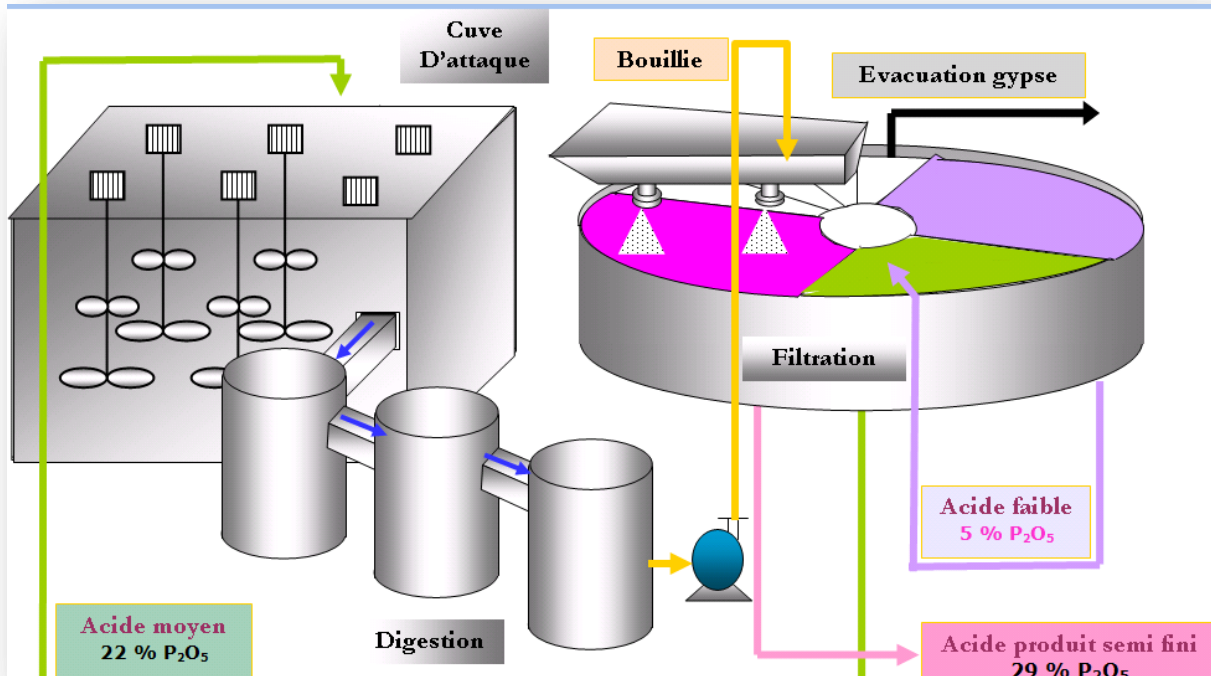


Figure 5: Attaque-Filtration

La section attaque-filtration est composée d'une cuve d'attaque, une cuve de digestion, un système de refroidissement, un système d'extraction et lavage des gaz, deux filtres de séparation solide-liquide et deux systèmes de création de vide.

La section d'attaque comporte une cuve « 303-AR-01 ». Cloisonnée en 8 compartiments parfaitement agités. Chaque compartiment, est équipé d'un agitateur pour une bonne homogénéisation de la bouillie d'attaque.

L'acide sulfurique est alimenté dans deux compartiments 1et 3. La pulpe est injectée dans les compartiments 2 et 4 puis mélangé avec un grand débit de bouillie retournant dans le compartiment 1.

La pulpe doit être bien agitée afin d'éviter la formation d'une couche de phosphate, la passivation et les pertes en phosphate. Après son refroidissement, la bouillie recyclée du Flash cooler est introduite dans le premier compartiment de la cuve de digestion.

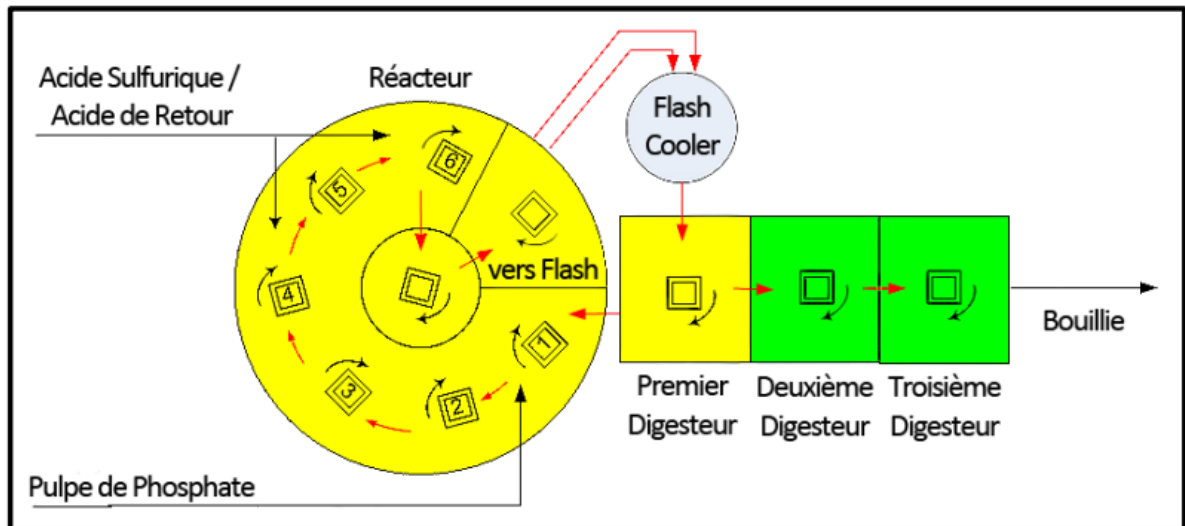


Figure 6: Réacteur d'attaque et cuve de digestion

✓ Digestion

Par débordement, la bouillie passe de la cuve d'attaque à la cuve de digestion à travers trois digesteurs chacun est équipé d'un agitateur. La section de digestion est destinée à augmenter le temps de séjour favorisant une bonne formation des cristaux et une conversion plus complète du P_2O_5 , La bouillie est ensuite refoulée vers le filtre.

✓ Filtration

La séparation de l'acide phosphorique et du sulfate de calcium résiduaire est effectuée à l'aide d'un filtre rotatif, sous vide à lavage systématique à contre-courant.

Le filtre utilisé est un filtre à cellules basculantes subdivisées en :

- Secteur fort

La quantité de filtrat correspondant à la production est envoyée vers le stockage d'acide 29 %. Le surplus de ce filtrat est envoyé à l'aspiration de la pompe d'acide recyclé.

- Secteur moyen

Le filtrat récupéré au deuxième lavage est drainé vers l'auge de premier lavage, le filtrat de ce lavage va à l'aspiration de la pompe d'acide recyclé.

- Secteur faible

L'eau ayant lavé les toiles est pompée vers l'auge du deuxième lavage de gypse.

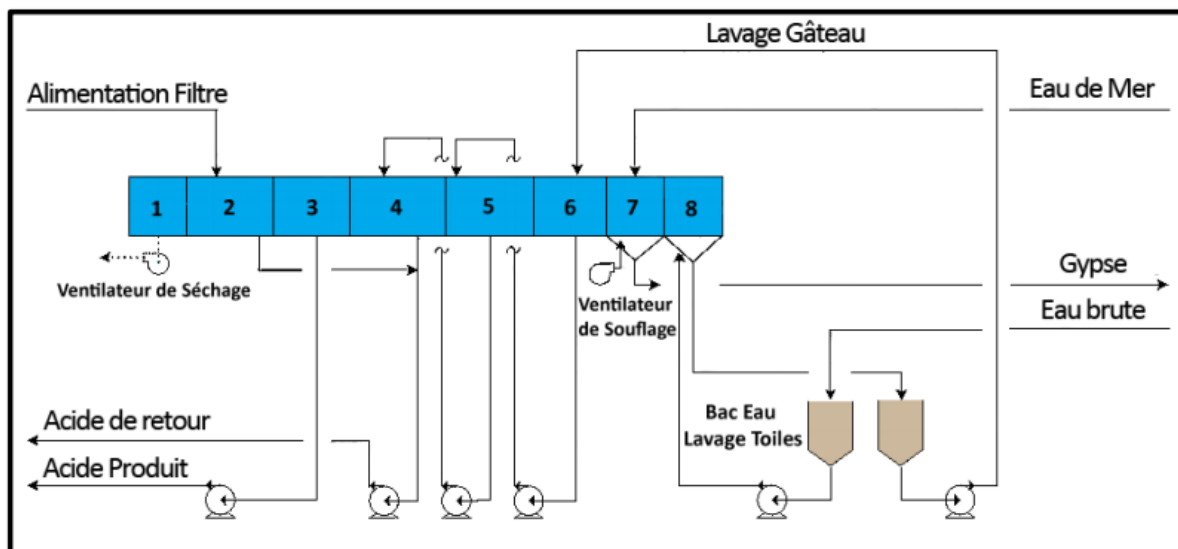


Figure 7: Section de filtration

✓ Unité de stockage d'acide 29% P_2O_5

L'acide sortant de la filtration contient des solides (gypse, sel fluoré et de silice) venant de :

- Cristaux qui sont passés au travers des toiles de filtration

- Désursaturation de l'acide

Pour leur aspect abrasif sur les concentrations et pour ne pas surcharger les concentrations, ils sont enlevés à l'aide d'un désursaturateur et un décanteur.

✓ Unité de concentration dans une boucle sous vide

La concentration de l'acide consiste en un chauffage indirect de l'acide suivi d'une évaporation sous vide pour obtenir un acide à une concentration de 54% en P_2O_5 , qui sera envoyé vers le stockage.

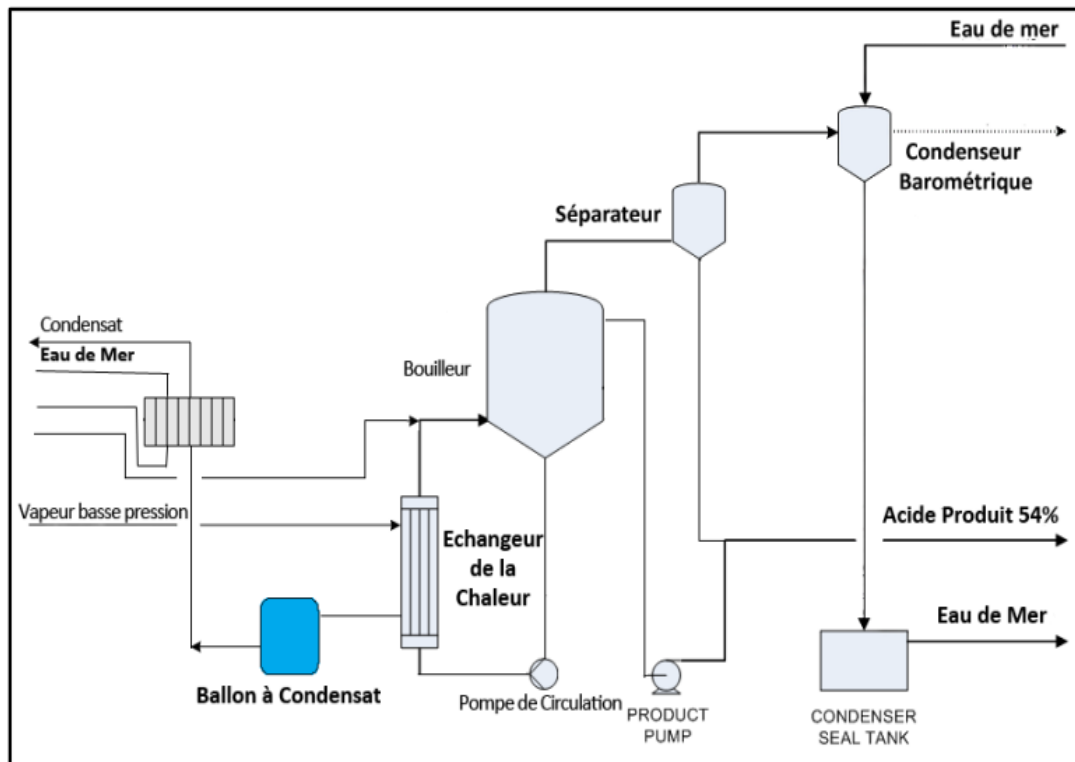


Figure 8: Ligne de concentration de l'acide 29%

✓ Unité de stockage d'acide 54% P_2O_5

Lors de la concentration, la teneur en P_2O_5 de l'acide augmente. Cela a pour conséquence de diminuer les constantes de solubilité d'une série de composés ($CaSO_4 \cdot 1/2 H_2O$, Na_2SiF_6 , K_2SiF_6 ...). D'où formation de solides.

II.3. Atelier des engrais

L'un des procédés de fabrication des fertilisants minéraux phosphatés consiste à mélanger l'acide phosphorique et le phosphate naturel pour obtenir le Superphosphate triple. Il dose de **38 à 45 %** de P_2O_5 .

II.4. Atelier des Utilités

Cet atelier est destiné à la production de l'énergie électrique, la gestion de la vapeur et le traitement des eaux nécessaire à la production de l'acide phosphorique P_2O_5 . Il comporte :

- ✓ **Une centrale thermoélectrique**
- ✓ **Unité de traitement des eaux douce TED**

III. Conclusion

On a ainsi présenté le groupe **OCP**, les poumons de l'industrie marocaine et qui ne cesse de suivre le développement industriel du phosphate afin d'atteindre une bonne production et une qualité meilleur.

On a aussi donné les généralités et les spécifications nécessaires du procédé pour faciliter par la suite, la compréhension des différents phénomènes et choisir les pistes d'étude à aborder.

Chapitre II: Position du problème

I. Les Agitateurs de la cuve de digestion



Figure 9: Agitateur

I.1. Introduction

Cette partie fait l'objet d'une étude de l'un des plus importants équipements dans la section de production phosphorique. Cette étude consiste à bien mettre en évidence l'origine de cisaillement des agitateurs de la cuve de digestion.

Comme le montre l'image ci- dessus, cet agitateur se compose de deux niveaux. Le cisaillement se présente fréquemment dans le niveau deux et plus précisément dans la partie soudée.

À la lumière d'une étude critique préalable et dans le cadre de la solution proposée, nous allons présenter les différentes technologies pour remédier à ce problème afin d'éviter la panne et assurer l'agitation de la bouillie dans des meilleures conditions.

I.2. Définition de l'agitation

L'agitation est une opération qui consiste en la mise en mouvement d'une quantité de fluide dans une cuve par un agitateur. Le mélange correspond quant à lui à l'interpénétration d'au moins deux phases initialement séparées.

I.3. Description des agitateurs

Les agitateurs sont des machines rotatives, équipées de grandes pales pour assurer la circulation du liquide avec un résultat d'agitation efficace. En effet les agitateurs sont au cœur de nombreux procédés de fabrication, sans lesquels, peu de réactions chimiques ou de mélanges se réaliseraient spontanément. Les agitateurs créent un courant tri-directionnel dans les cuves de circulation où une vitesse d'écoulement turbulente, garantissant ainsi un mélange continu des boues.

JFCV utilise trois agitateurs dont le rôle principal est l'augmentation du temps de séjour de la bouillie.

I.4. Système d'agitation pour section de cuve de digestion

Durant la réaction, l'agitation doit répondre aux conditions suivantes :

- maintenir les solides en suspension.
- renouveler la couche de liquide sur les grains de Phosphate et favoriser une homogénéisation des concentrations, en permettant une répartition régulière des particules pour faciliter la dissolution.
- briser les mousses présentes à la surface du liquide.

I.5. Description détaillée des équipements

Le système se compose de :

- Un moteur électrique de 90 KW, 1500 tr/min monté sur une base attenante au réducteur.
- Un coupleur hydraulique monté sur l'arbre.
- Une transmission par courroies.
- Un réducteur.
- Un fut support sur lequel est fixé le réducteur.
- Un accouplement rigide monté sur l'arbre petite vitesse du réducteur.
- Un agitateur tubulaire de 4 pales.



Figure 10: les pales de l'agitateur

La détermination mécanique d'un agitateur consiste à dimensionner chaque élément constitutif à partir des données suivantes :

a- Type d'agitateurs et positionnement :

- Mobiles à écoulement radial
- Mobiles à écoulement axial
- Mobiles à écoulement mixte
- Mobiles à écoulement tangentiel
- Géométrie de la cuve (dimensions, formes)

b- Durée du mélange

c-Conditions physiques imposées (pression, température)

d-Puissance installée :

- Type et diamètre du mobile d'agitation
- Longueur de l'arbre
- Vitesse de rotation
- Matériau de construction

La résolution d'un problème d'agitation ne se limite pas seulement au choix d'un type de mobile mais nécessite de prendre également en compte un grand nombre de paramètres mécaniques assurant la fiabilité et la maintenance du système.

I.6. Maintenance d'agitateur (Méthode AMDEC)

I.6.1. Introduction

On ne peut pas traiter un problème sans parler de la maintenance qui reste le pilier de chaque domaine surtout lorsqu'on parle de la prévention avant d'avoir recours à la correction.

I.6.2. Définition de la maintenance

Selon la définition AFNOR, la maintenance regroupe l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise.

I.6.3. Typologie de la maintenance

Il existe 2 façons complémentaires d'organiser les actions de la maintenance :

La maintenance corrective : qui consiste à intervenir sur un équipement une fois que celui-ci est défaillant.

La maintenance préventive : qui consiste à intervenir sur un équipement avant que celui-ci ne soit défaillant, afin de tenter de prévenir la panne.

Diverses méthodes permettent d'améliorer la planification et l'ordonnancement des actions de maintenance à savoir :

- Analyse AMDEC
- Réseau PERT

I.6.4. L'étude AMDEC

L'agitateur nécessite une technique pour identifier les défaillances afin d'améliorer les performances et la prévention des risques.

Pour approfondir l'analyse des défaillances dont les conséquences affectent le fonctionnement des agitateurs tournants de l'installation, on va procéder à une étude détaillée basée sur une analyse des Modes des défaillances de leurs Effets et de leurs Criticités.

Nous visons à travers cette étude d'atteindre les objectifs suivants :

- Diminuer le nombre des pannes, c'est-à-dire d'assurer la fiabilité du système.
- Réduire le temps d'indisponibilité (Maintien).
- Garantir le temps de fonctionnement (Disponibilité).
- Limiter les risques liés à la sécurité.

La majorité des problèmes rencontrés sont dus soit à une mauvaise installation, et non control et nettoyage régulier du système ce qui a été le cas dans l'entreprise d'accueil. Les responsables se limitent seulement au control de la bouillie et le réducteur, ils s'interviennent lorsque le réducteur tombe en panne, alors que l'agitateur a été cisailé déjà depuis longtemps

Ce manuel d'instructions contient toutes les indications de base qui doivent être exécutées pendant l'installation, la mise en service et la maintenance :

✓ **L'installation :**

L'installation et l'utilisation de l'agitateur doivent toujours être faites conformément à la réglementation applicable en matière sanitaire et de sécurité.

Avant de mettre l'agitateur en marche, il faut vérifier qu'il est bien correctement ancré et que l'arbre est parfaitement aligné. Un mauvais alignement ou des forces excessives dans les connexions peuvent entraîner de graves problèmes mécaniques pour l'agitateur..

Respecter le sens de rotation de l'élément d'agitation, comme l'indique la flèche collée sur le moteur. Un sens incorrect entraîne une perte d'efficacité de l'agitation.

Ne jamais appliquer une force sur l'extrémité de l'arbre d'agitation, car il pourrait facilement acquérir une déformation permanente.

✓ **Réception:**

Lors de la réception de l'agitateur, vérifier l'emballage et son contenu pour contrôler que tout est bien conforme au bon de livraison. Et s'assurer que l'agitateur n'a subi aucun dommage.

✓ **Stockage :**

Si l'agitateur n'est pas installé immédiatement, il doit être stocké dans un lieu adéquat. L'arbre doit être entreposé en position horizontale, et sur des supports en bois ou en matériau similaire. L'arbre dans cette position ne se déformera pas, mais ne doit supporter aucun type de charge/

✓ **Transport :**

Prendre toutes les précautions possibles pour soulever l'agitateur. Utiliser toujours des élingues bien fixées pour déplacer l'agitateur avec une grue ou avec un autre système de levage.

Les agitateurs, selon le modèle, sont trop lourds pour pouvoir être entreposés ou installés manuellement. Utilisez un moyen de transport adapté.

✓ **Maintenance :**

Contrôler l'agitateur de manière régulière.

Ne pas négliger le nettoyage de l'agitateur.

Vérifier l'état du moteur / réducteur.

✓ **Pièce de rechange :**

Pour commander des pièces de rechange, il est nécessaire d'indiquer le type et le numéro de série qui sont notés sur la plaque de caractéristiques de l'agitateur, ainsi que la position et la description de la pièce.

✓ **Conservation :**

Si l'agitateur est mis hors service pendant longtemps, il est nécessaire de nettoyer et de traiter les pièces à l'huile minérale.

L'agitateur ne peut JAMAIS travailler sans produit. L'élément d'agitation doit être submergé dans une profondeur au moins égale à 1,5 fois son diamètre.

Ce manuel permet donc de faire la prévention et éviter tout effet négatif avant qu'il ne se produit mais en cas de risque ça nécessite une analyse critique consistant à identifier de façon inductive et systématique l'origine de dysfonctionnement des équipements puis à en rechercher les origines et leurs conséquences.

1.6.5. Démarche pour l'élaboration du plan AMDEC

AMDEC Consiste à quantifier l'importance de chaque défaillance en analysant les risques potentiels, se traduit par le calcul de la criticité.

Le schéma ci-dessous montre les étapes à suivre pour réaliser l'AMDEC :

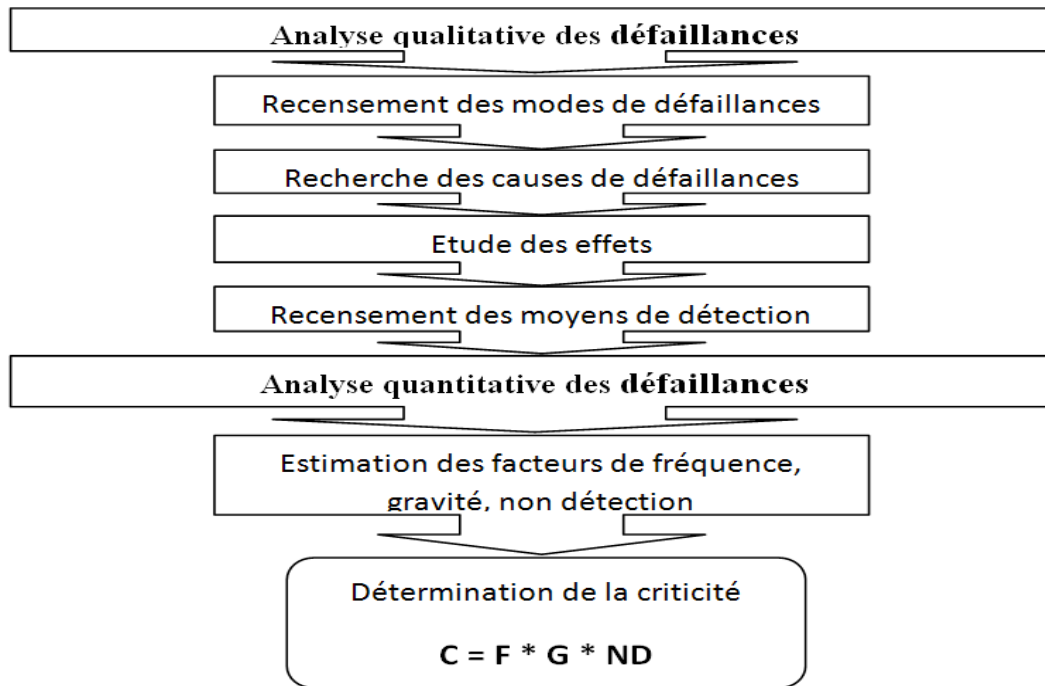


Figure 11: Analyse qualitative des défaillances

La criticité est une évaluation quantitative du mode de défaillance et permettant l'hierarchisation des équipements en ordre de priorité. Plusieurs indices peuvent être utilisés pour déterminer la criticité, souvent dans la pratique on considère trois indices :

a-Indice de gravité (G) : il est relatif aux conséquences provoquées par l'apparition du mode de défaillance en termes de temps d'intervention. Il traduit l'effet le plus grave produit par le mode.

b-Indice de fréquence (F) : il est relatif à la fréquence d'apparition de la défaillance. Cette fréquence exprime la probabilité d'apparition du mode par l'apparition de la cause.

c-Indice de Non-détection (ND) : il est relatif à la possibilité de détecter la défaillance avant qu'elle ne produise l'effet.

Grille AMDEC des agitateurs de la cuve de digestion :

BUNGE MAROC PHOSPHORE		Etude : Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité					Atelier : PHOSPHORIQUE				
Secteur : Agitateur cuve d'attaque de la section « Attaque filtration »							Unité maintenance : Atelier mécanique				
Matériel		Caractéristique de la défaillance					Criticité		Résultat d'étude		
Equipement ↑	Organe	Fonction	Mode de défaillance	Cause de défaillance	Effet	Détection	Gravité	Occurrence	détection	Non- Criticité	Actions à mener
Système d'agitation	Moteur d'entraînement	Transformation de la puissance électrique en Puissance mécanique	- Echauffement -vibration	-Surcharge -Roulement défectueux -Ventilation défectueuse	-Mauvaise transmission -Défaillance des roulements	Echauffement + bruit	3	1	1	3	-Contrôle de l'état des boulons -Contrôle de l'état des roulements -Resserrage régulier -Contrôle de l'état du châssis
			Usure du châssis	-Vibrations -Desserrage des boulons de fixation -Environnement corrosif	- Echauffement du moteur						
	Coupleur hydraulique	Accouplement progressif	Usure des joints	Quantité d'huile insuffisante	-Vibration d'agitateur -Desserrage des vis - Transmission	Bruit + contrôle visuel	2	1	1	2	-Vérification régulière du niveau d'huile -Contrôle d'alignement -Inspection

			<ul style="list-style-type: none"> - Vibration et bruit - Déséquilibre - Surchauffe 	<ul style="list-style-type: none"> -Vibrations -Température d'huile très élevée 	n insuffisante		2	2	1	4	périodiques pour éliminer les fuites d'huile
Poulie-courroie	Transmission de puissance	- Désalignement	-Vibrations	-Défaillance prématurée des roulements.	Contrôle et mesure	1	1	1	1	<ul style="list-style-type: none"> -Contrôle d'alignement des courroies -Contrôle de la tension des courroies -Réglage de la tension de la courroie 	
		-Usure de la poulie et de la courroie	<ul style="list-style-type: none"> -Adhérence -Manque de tension 	<ul style="list-style-type: none"> - Vibrations, frottements, -Arrêts de production non planifiés 		2	1	1	2		
Réducteur	Transmission de puissance	Usure des dents	-Manque d'huile		Bruit et échauffement	3	1	1	3	<ul style="list-style-type: none"> -contrôle du niveau d'huile -changement régulier d'huile -graissage régulier des paliers -contrôle de l'étanchéité -contrôle du bruit et du vibration -contrôle de la denture -nettoyage régulier du capot. 	
		<ul style="list-style-type: none"> -Bruit anormal -Echauffement 	<ul style="list-style-type: none"> -Roulement défectueux -Vibration -Paliers défectueux 	<ul style="list-style-type: none"> -Vibration -échauffement -Détérioration du réducteur 		2	2	1	4		

Arbre d'agitation	Transmission du mouvement	- Cisaillement -Torsion	-Désalignement d'arbre -Vibration anormale -Détérioration d'état de surface -formation de rouille -taux de solide élevé -mauvaise soudure	Détérioration d'arbre - Agitation non optimale -Arrêt imprévu de production	Contrôle visuel	2	2	2	8	-contrôle de la dureté d'arbre -contrôle régulier de la géométrie d'arbre (verticalité + centralité) -Contrôle d'alignement -nettoyage des surfaces d'arbre -mesure de vibration systématique
Pales	Agitation	-Usure -Abrasion -Erosion	-attaque chimique -échauffement -accumulation des soudures	détérioration des pales - agitation non optimale	Contrôle visuel	3	2	3	18	-contrôle de l'état des pales -remplacement des pales si nécessaire -nettoyage régulier des pales
Palier	Support	-Usure	-Manque de graisse -échauffement	- Détérioration des paliers	Contrôle visuel	1	1	2	2	-contrôle de l'état des paliers -contrôle des soudures -graissage des paliers

Tableau 1: Grille AMDEC

II .Problèmes liés aux agitateurs

II.1. La soudure

En se basant sur la grille on voit clairement que le problème de soudage remonte le premier au niveau de la criticité.

En analysant les circonstances relatées sur l'historique des pannes, les photos, le rapport du fabricant du service maintenance, il s'avère que le problème de cisaillement au niveau de l'arbre est lié au soudage.

Une simple visualisation montre que les cordons couvrent seulement le périmètre de l'arbre on parle de la partie liant l'arbre et le cube. Ce qui ne permet pas une parfaite cohésion et une grande résistance.

La solution qui a été déjà proposée par le service mécanique c'est de mettre des plaques de 12 mm liant le cube et l'arbre et les souder dans le but de renforcer l'arbre comme le montre l'image.



Figure 12: Arbre après renforcement

Comme le soudage durcit le métal donc cette partie devient très sollicitée risque et probabilité d'être cisailée à tout moment donc cette solution n'a pas résolu le problème. D'où la nécessité d'effectuer un traitement thermique pour adoucir la surface dit traitement thermique après soudage (TTAS).

II.2. TTAS après soudage

L'application de TTAS consiste à étudier certains paramètres :

- Matériau de construction
- Les zones du soudage
- L'hypertrempe
- Le revenu
- Les contraintes résiduelles

II.2.1. Matériau de construction

Le matériau utilisé dans l'installation est un inox UB6, l'un des types des aciers super austénitiques.

L'**Acier** inoxydable super austénitique a pour structure de base l'alliage bien connu 18% chrome et 24% nickel. Dont les désignations normalisées et la composition chimique sont présentées dans les tableaux suivants :

AFNOR	AISI	NF EN 10088-3
Z2CNDU25.20	904L	X1CrNiMoCu 25.20.5 (1.4539)

Tableau 2: Désignations normalisées

C	Cu	Mn	Ni	Cr	S
0.02 Maxi	1.00/2.00	2.00 Maxi	24.00/26.00	19.00/21.00	≈0.010 Maxi

Tableau 3: Composition chimique d'UB6

Ce type d'acier inoxydable n'est pas le plus efficace mais plus largement utilisé, résiste à la corrosion dans de nombreuses circonstances, et comme ces caractéristiques mécaniques sont acceptables, il est principalement utilisé dans le domaine des industries de transformation, ainsi que dans quelques types d'industries chimiques. Dont les caractéristiques mécaniques à l'état adouci sont présentées dans le tableau suivant :

Rp Mpa N/mm ²	Re Mpa N/mm ²	A %	Dureté HB
530 / 730 maxi	230	35 mini	230 maxi

Tableau 4: les propriétés mécaniques d'UB6

Après le soudage les caractéristiques mécaniques du matériau changent dans la partie soudée, donc l'arbre peut subir un cisaillement. On peut donner au soudage la définition suivante :

Le soudage est un moyen d'assemblage permanent destiné à créer une continuité de la nature des matériaux assemblés : métaux et matières plastiques notamment. Le soudage autorise l'assemblage permanent par fusion des bords des pièces à réunir.

Il existe trois types de soudure, dans notre cas il s'agit d'une soudure homogène dans laquelle les métaux de base et le métal d'apport sont de même nature, mais ca nécessite de suivre une procédure pour les souder pour avoir une bonne soudure.

II.2.2 Soudage d'UB6

Le soudage des aciers super austénitiques subissent une transformation **Austénite==>Ferrite** à haute température provoque une fissuration à chaud. C'est pourquoi il est conseillé de souder ces aciers à l'électrode enrobée ou par le procédé **TIG et MIG** ne présente pas de difficultés particulières. Dans la majorité des cas, réaliser un joint soudé permet d'obtenir une bonne résistance à la corrosion et on évite ainsi la fissuration à chaud après le soudage. Ci-dessous les règles à adopter pour garantir une meilleure soudure :

a- Adopter un métal d'apport de composition chimique analogue à celle du métal de base. Les fabricants de produits d'apports proposent pour chaque nuance d'acier un vaste choix d'électrodes, de fils d'apports dont la composition chimique est en principe équilibrée de façon à obtenir une structure après soudage qui comporte moins de 5% de ferrite.

b- Eviter toute pollution des bords à souder qui pourrait être préjudiciable à la tenue à la corrosion de l'assemblage ou encore provoquer une fissuration à chaud de la soudure.

c- Effectuer si nécessaire une passivation de la soudure qui reconstitue la pellicule d'oxydes de chrome réduite par l'opération de soudage.

En générale il faut signaler deux problèmes liés au soudage des aciers austénitiques :

d- le premier, lié à la résistance du métal d'apport, peut être résolu en employant comme métal d'apport des nuances au manganèse et l'azote, possédant une limite d'élasticité comparable à celle du métal de base.

e- le second est lié à l'adoucissement du métal de base en zone affectée thermiquement, il peut être minimisé par l'emploi de traitement de revenu.

II.2.3 les zones de soudage

Comme le soudage du matériau entraîne des modifications de la microstructure et des propriétés mécaniques. On observe deux zones peuvent être distinguées, une première zone entièrement fondue pendant le soudage (**ZF**) : Cette zone a une microstructure différente de celle du matériau de base. Et une zone dite affectée thermiquement (**ZAT**) : de part et d'autre du cordon cette zone reste à l'état solide au moment du soudage mais subit de fortes variations de température.

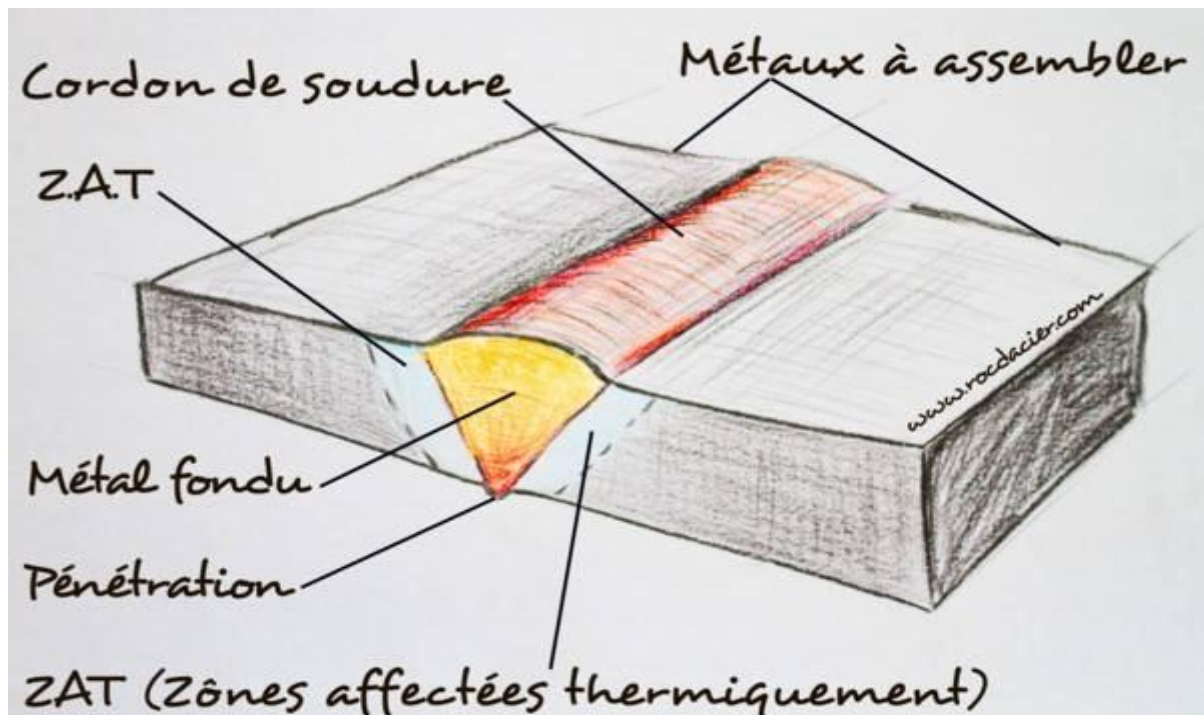


Figure 13: Les zones observées lors du soudage

D'après les travaux effectués par J. A. Brooks et al. [1] sur trois aciers inoxydables, la limite d'élasticité du matériau soudé est supérieure à celle du matériau non soudé. En ce qui concerne le comportement en résilience, les énergies de rupture du matériau soudé sont plus faibles que celles du matériau de base.

Concernant les essais de dureté, la zone fondue est plus dure que le reste du matériau, dans l'état brut de soudage ou après traitement thermique de revenu [4], [3]. La différence de taille de grains, expliquerait cet écart de dureté. Les essais de duretés effectués par J. M. Wright [2] dans la zone affectée thermiquement montrent une forte variation dépendant de la distance au cordon. Ces résultats confirment bien l'important gradient de microstructure dans cette zone.

Après traitement de revenu, les variations de dureté de la **ZAT** s'atténuent. Les résultats obtenus par K. Ozbaysal et al. [4] montrent que le mécanisme de durcissement pendant le traitement de revenu du matériau soudé est le même dans le matériau de base. D'où la nécessité de mettre un traitement de revenu.

II.2.4 Traitement de revenu

Le revenu est un traitement thermique qui est souvent associé à l'hypertrempe pour les aciers austénitiques il permet d'atténuer ses effets en rendant la pièce plus ductile et plus tenace et ainsi adoucir le matériau en éliminant en partie la dislocation générée par l'hypertrempe et obtenir meilleur compromis entre résistance et ténacité après le soudage. Il a la particularité de produire deux effets :

- Abaissement de la limite d'élasticité.
- Détensionnement des contraintes résiduelles sur la partie du soudage.

Les aciers austénitiques peuvent être sensibilisés à la corrosion intergranulaire en **ZAT**. Si cette sensibilisation ne peut être acceptée, seul un traitement d'hypertrempe de l'ensemble de la pièce pourra la retirer.

II.2.5 L'hypertrempe

Il s'agit du traitement thermique de qualité typiquement appliqué aux aciers inoxydables austénitiques. Il consiste en un maintien à haute température (de **1 000** à **1 150** °C) suivi d'un refroidissement rapide et quelconque (air-huile-eau) ce qui permet de retirer toute corrosion intergranulaire en **ZAT**.

Durée de maintien

Lors du chauffage des pièces massives, il faut limiter les vitesses de montée en température, l'austénite ayant une conductivité thermique faible ce qui augmente les gradients thermiques, et donc les contraintes d'origine thermique.

En pratique, on peut préconiser des durées de chauffage de **0,7** à **2,5** minutes par millimètre d'épaisseur. On choisira le haut de fourchette pour une élimination complète des contraintes. D'une manière générale pour limiter les contraintes résiduelles dues au soudage, et cela pour toutes les nuances, on pourra être amené à pratiquer des traitements de détensionnement des contraintes.

II.2.6. Détensionnement des contraintes

Les aciers inoxydables austénitiques sont particulièrement sensibles à cette seconde source de contraintes résiduelles après soudage pour deux raisons :

Leur faible conductivité thermique, et leur fort coefficient de dilatation thermique. Dans bien des cas, les contraintes résiduelles sont voisines de la limite d'élasticité du métal.

L'élimination des contraintes est réalisée lors d'un maintien à chaud par deux phénomènes complémentaires :

- la diminution de la limite d'élasticité du métal
- le phénomène de fluage

Effets du traitement de détensionnement des aciers inoxydables austénitiques		
Température de maintien (°C)	Contraintes résiduelles éliminées (%)	Remarques
950 à 1 050	95 à 100	Le traitement s'apparente à une hypertrempe, sauf en ce qui concerne le refroidissement
850 à 950	80 à 85	Permet la coalescence des carbures et une réhomogénéisation de la teneur en chrome
550 à 650	=35	Améliore la stabilité dimensionnelle
200 à 400	5	Élimine essentiellement les pics de contrainte résiduelle

Tableau 5: Effets du traitement de détensionnement des contraintes résiduelles

Le revenu permet de traiter la surface après soudage afin de limiter les contraintes résiduelles dans la partie soudée ça reste une solution parmi d'autre comme celle du renforcement du cordon de soudure. Mais pour étudier plus précisément l'origine du cisaillement afin d'augmenter le taux de disponibilité on était censé d'étudier le couple résistant agit au niveau de la cuve de digestion.

II.3. Influence du couple résistant

Le cisaillement apparait une fois le couple résistant agit au niveau de la cuve dépasse celui délivré par le constructeur ou le couple moteur pour vérifier cette condition s'elle est respectée ou pas c'est ce que nous allons vérifier par ce calcul.

Couple max C_m	Accélération de la pesanteur g	Masse volumique maximale ρ	Hauteur du niveau1 h_1	Hauteur du niveau2 h_2
16000 N.m	10 m/s ²	1540 Kg/m ³	3.2m	5.9m

On se basant sur l'assimilation de l'agitateur sur un logiciel CATIA, en respectant les dimensions données par le constructeur on avait trouvé les résultats regroupées dans le tableau ci-dessous :

La surface des pales : S	Centre de gravité de l'arbre inférieure : R_1	Centre de gravité des pales : R_2
0.54 m ²	1.2 m	0.228 M

II.3.1. Calcul du couple résistant

D'après la relation fondamentale de l'hydrostatique

$$P = \rho gh \quad (P = \text{pression})$$

Calcul de la pression et la force, couple dans le niveau 1 :

$$\begin{array}{l|l|l}
 P_1 = \rho g h_1 & F_1 = P_1 * S & C_1 = F_1 * R_2 \\
 = 49280 \text{ Pa} & = 26611.2 \text{ N} & = 6067.3 \text{ N.m}
 \end{array}$$

Calcul de la pression et la force, couple dans le niveau 2 :

$$\begin{array}{l|l|l}
 P_2 = \rho g h_2 & F_2 = P_2 * S & C_2 = F_2 * R_2 \\
 = 90860 \text{ Pa} & = 49064.4 \text{ N} & = 11186.68 \text{ N.m}
 \end{array}$$

$$C_r = C_1 + C_2 = 17254.03 \text{ N.m} > C_m = 16000 \text{ N.m}$$

On voit clairement que le couple délivrée par le constructeur a été dépassée.

II.3.2. Calcul du couple moteur

Vitesse de sortie du réducteur : N_s	Vitesse d'entrée du réducteur : N_e	Puissance motrice : P_m	Rendement du réducteur
54.88 tr/min	16665.8 tr/min	90 KW	0.9

$P_U/P_m=0.9$ avec (P_U c'est la puissance utile)

$$P_U = 0.9 * P_m = 81 \text{ Kw}$$

$$P_U = C \omega \implies C = P_U / \omega \quad \text{avec} \quad \omega = 2\pi N_s / 60$$

$$C = 30 * P / \pi N_s = 14094.26 \text{ N.m}$$

$C < C_r \implies$ Le couple résistant dépasse le couple moteur

II.3.3. Les solutions proposées

Pour réduire le couple résistant agit au niveau de la bouillie on avait proposé de

✓ **Controler la masse volumique**

Pour résoudre ce problème on peut agir sur la masse volumique en cas de dépassement un système d'alerte se déclenchera vu que ça va prendre du temps pour réagir sur les entrées et les sortir alors on avait proposé des autres solutions tout en gardant le couple résistant qu'on vient juste de calculé

✓ **Augmenter l'épaisseur de l'arbre**

Pour que l'arbre résiste au couple résistant trouvé, fallait augmenter l'épaisseur de l'arbre avec un nouveau couple moteur supérieur que celui du couple résistant autrement dit changer le réducteur, en prenant en considération le poids qui sera ajouté en augmentant ainsi l'épaisseur de l'arbre inférieur.

On calcul ainsi :

a- La force agit au niveau de l'arbre inférieur

$$F = C_r / R_1 = 14378.35 \text{ N}$$

$$F = P * S = P * 2\pi e h \quad (\text{h c'est la hauteur de l'arbre inférieur})$$

b- L'épaisseur e proposée est le suivant :

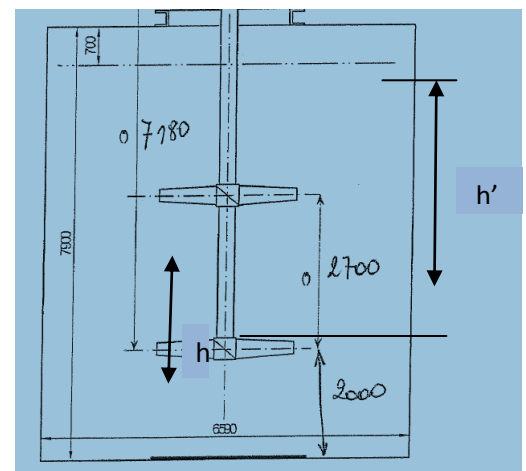
On calcule tout d'abord la pression

$$P = \rho g h'$$

$$= 70070 \text{ Pa}$$

$$e = F / 2\pi * P * h = 14378.35 / 2\pi * 70070 * 2.4$$

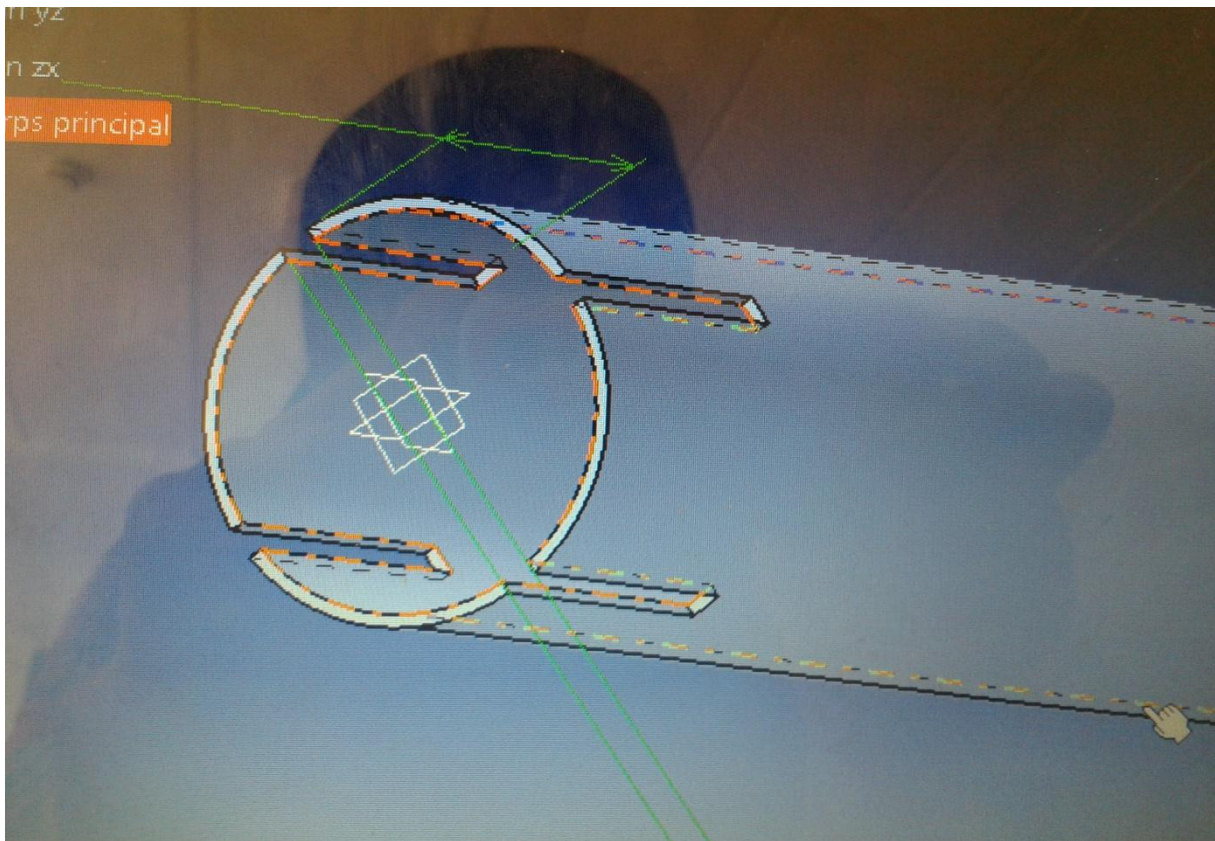
$$e = 13.6 \text{ mm}$$



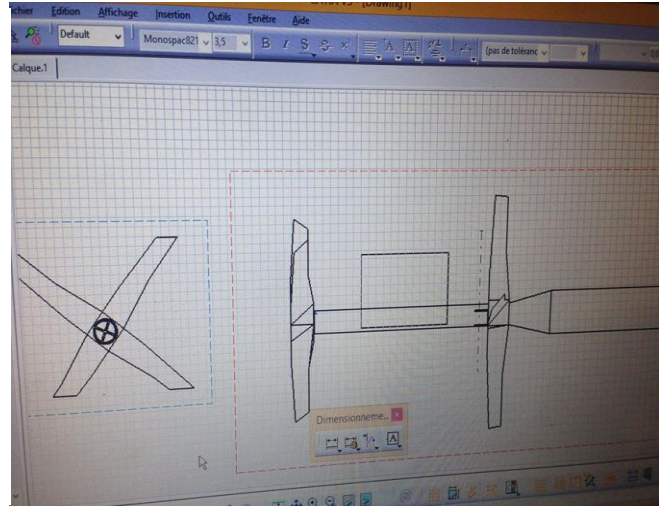
Pour que l'arbre résiste à la corrosion et augmenter sa durée de vie on propose ainsi de normalisée l'épaisseur calculée à 16 mm.

✓ Renforcement de la partie cisailé

Afin d'augmenter la résistance de la partie cisailée et diminuer le risque de cisaillement on a proposé d'augmenter cette surface, en mettant des plaques croisées et les soudées avec l'arbre qui va prendre la forme suivante.



Pour estimer l'importance de la solution on avait fait la simulation toujours sur CATIA comme le montre l'image ci-dessus et on a observé clairement que les contraintes diminuent à ce niveau ça reste une solution importante mais pas efficace, risque d'être cisailé plus tard.



✓ **Changement du matériau**

Après avoir étudié le matériau et vu le problème existant à ce niveau de la résistance au couple on avait proposé un matériau beaucoup plus résistant et avec des caractéristiques importantes tel que l'UB6 c'est un acier duplex austéno ferritique.

✓ **Introduction aux aciers duplex**

Les aciers inoxydables duplex constituent une famille de nuances d'acier combinant à la fois une résistance mécanique élevée et une bonne résistance à la corrosion. Leurs propriétés physiques se situent entre celles des aciers inoxydables austénitiques et celles des aciers ferritiques c'est pourquoi on les appelle des aciers austéno ferritique. Dont l'analyse et normes de référence et les propriétés physiques des deux matériaux sont présentées dans les tableaux suivants :

Nuance	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	S	P	Cu	N
UGI 4462	≤ 0.03	≤ 0.75	1-2	5 ⁻²	22-23	2.5-3.5	≤ 0.01	≤ 0.035	-	0.11-0.22
UGI 4539	≤ 0.03	≤ 1	≤ 2	24-25	19-20	4-5	≤ 0.01	≤ 0.025	1.2-2	≤ 0.15

Tableau 6: Composition chimique de duplex et UB6

UGI	EN 100088 Numérique	EN 10088 Alphanumérique	AISI	UNS
UGI 4462 (54N)	1.4462	X2 CrNiMoN 22-5-3	ASTM A 182-F51	UNS S32205
UGI 4539(904L)	1.4539	X1 NiCrMoCu 25-20-5	904L	UNS N08904

Tableau 7: Normes de référence

	Symbole	Unité	Température	Valeur	
				4462	4539
Densité		Sans Dimension	4°C	7.8	8.05
Chaleur spécifique	C	J.Kg. °C	20°C	400	500
Conductivité Thermique	K	W/M. °C	20°C	16	14
Module d'élasticité longitudinal	E	MPa.10 ³	20°C	200	205
Coefficient de dilatation linéaire	A		20 à 100°C	13	15.1

Tableau 8 : Propriété physique

La comparaison des propriétés physiques met en évidence le coefficient de dilatation plus faible et la conductivité thermique supérieure des Duplex. Et ainsi les caractéristiques mécaniques de ces dernières importantes que celle des UB6.

La comparaison des propriétés mécaniques entre les différentes familles d'aciers inoxydables montre que le meilleur compromis résistance à la traction - résilience est obtenu sur les aciers duplex.

Ce tableau permet de comparer les valeurs typiques de caractéristiques mécaniques pour acier duplex et austénitique.

Type d'acier	Rm(Mpa)	Rp(MPa)	KV(J)
Austénitique	550 à 700	≈250	≈200
Duplex	650 à 750	≈480	≈150

Tableau 9 : Propriété mécanique

D'après la comparaison entre les deux matériaux il apparait clairement que l'acier duplex résiste plus et peut résoudre les problèmes comme celle du cisaillement mais avec un coût élevé que celui d'UB6.

Conclusion

En conclusion, l'utilisation des agitateurs dans le processus de production de l'acide phosphorique demeure indispensable.

La grande importance accordée par les responsables de maintenance pour ces organes nous a donné l'enthousiasme d'étudier soigneusement l'origine des défaillances et adopter la méthode et technique de control pour s'investir ainsi et chercher la solution adéquate pour remédier à ce problème.

Pour corriger le problème au niveau de la partie cisailée, on avait critiqué le soudage en proposant de traiter la surface après soudage par un traitement thermique de revenu pour éliminer les contraintes résiduelles qui était une solution de correction.

Pour étudier l'origine du cisaillement on avait calculé le couple résistant qui agit au niveau de la bouillie et il s'est avéré qu'une fois le couple résistant dépasse celui délivré par le constructeur un risque de cisaillement s'impose. Ce qui nous a poussés à proposer d'augmenter l'épaisseur de l'arbre ou de renforcer la partie cisailée sinon changer le matériau par un autre beaucoup plus résistant pour éviter tout arrêt de production.

Bibliographies

[1] J. A. Brooks and J. W. M. Garrison, Welding Research Supplement, 1999, pp 280-291.

[2] J. M. Wright and M. J. Jordan, Metals Technology, 1980, pp 473-482.

[3] K. Ozbaysal and O. T. Inal, Materials Science and Engineering, A130, 1990, pp 205-517.

[4] K. Ozbaysal and O. T. Inal, Journal of Materials Science, 29, 1994, pp 1471-1480. Technology, 82, 1998, pp 13-20.

Cours de traitement thermique d'inox.pdf

Cours des aciers austénitiques. PDF

Cours des Métaux Détail Services 904L. PDF

information-technique-sur-acier-inoxydable-pdf-49-ko-serie_e-lser1

GED_2238. PDF

<http://poste-a-souder.comprendrechoisir.com/comprendre/soudure-zinc>

<http://zc1.campaignview.com/ua/SharedView?od=11287eca3aa5ba&cno=11a2b0b20e25ef5&cd=1479f69c6b12474&ld=1479f69c6ac5dcb>

http://www.soloswiss.fr/traitement_thermique_solo/la-trempe-et-le-revenu/index.html: la trempe et le revenu



