



NOCIVITE DES VIBRATIONS ENGENDREES DANS LES
CANALISATIONS ENTERREES PAR LE COMPACTAGE, LE
COMPACTAGE DYNAMIQUE, LE BATTAGE ET LE VIBRO-FONCAGE

Résumé : Certains travaux de génie-civil génèrent des vibrations importantes. Lorsque ces travaux sont réalisés à proximité d'une conduite de gaz, il faut s'assurer qu'ils ne mettent pas en danger sa structure. Ce guide est un outil d'évaluation de la nocivité de ces vibrations pour les canalisations enterrées, destiné à fournir aux Exploitants une argumentation visant à réglementer l'utilisation de certains engins à proximité de leurs ouvrages.

	Rédaction	Vérification	Approbation
Fonction	Expert Réseau	Expert Réseau	Pilote du processus réseau
Nom	RIEGERT Frederic	COLLINEAU Mathilde	FRANCOIS Damien
Date	Signé le 12/03/2010	Signé le 15/03/2010	Signé le 19/03/2010

Mise en application	22/03/2010	Indice	B
Type de document	Guide de Savoir Faire	Identification	GSF-0117
Objet de la révision	Mise à jour suite aux études du CRIGEN et développement d'un module spécifique dans l'outil RAMCES. Fusion GSF-117 et GSF-118		
Historique des révisions : A - 22/02/2006 - Publication dans SMGRTgaz-DOC avant révision prochaine			

Diffusion	Animateurs réseau Assistant Réseau
-----------	------------------------------------

Accès	Public
-------	--------

Réseau

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION	3
2. REFERENCES	3
3. SEUIL RETENU	3
4. BATTAGE ET VIBRO-FONCAGE	3
4.1. Les procédés de fonçage des pieux et des palplanches.....	3
4.2. Description des vibrations générées.....	5
4.3. Tenue mécanique des canalisations enterrées aux vibrations générées par le battage ou vibrofonçage.....	6
5. COMPACTAGE DYNAMIQUE	7
5.1. Principe	7
5.2. Tenue mécanique des canalisations enterrées aux vibrations générées par le compactage dynamique.....	7
6. COMPACTAGE	9
6.1. Fonctionnement d'un compacteur	9
6.2. Les classes de compacteurs	10
6.3. Description des contraintes générées	11
6.4. Tenue mécanique des canalisations enterrées aux vibrations générées par des compacteurs	12
7. ANNEXE 1 : BATTAGE OU VIBRO-FONCAGE	13
8. ANNEXE 2 : COMPACTAGE DYNAMIQUE.....	15

1. INTRODUCTION

Les canalisations enterrées peuvent être soumises à des vibrations de diverses origines. En particulier, certains travaux de génie civil sont générateurs de vibrations assez importantes. Ce guide explique les contraintes vibratoires que peuvent engendrer le compactage, le compactage dynamique, la battage et le vibrofonçage. Il présente aussi les modules RAMCES dédiés à ces situations.

2. REFERENCES

- [1] *CRIGEN - Préconisations pour l'utilisation d'engins de compactage à proximité des canalisations de gaz - DRX.TTP.2008.0042.LBo.*

3. SEUIL RETENU

Le niveau maximal admissible pour des vibrations sera défini à partir d'un seuil en vitesse particulière : la valeur limite retenue est 50 mm/s. Ce seuil provient de mesures expérimentales de l'American Gas Association lors de tirs d'explosifs. On constate qu'il y a un lien direct entre les dégâts occasionnés et la vitesse particulière mesurée à proximité de l'ouvrage soumis à vibrations.

La façon de mesurer la vitesse particulière dans les mesures de l'AGA est effectuée en fonction de la quantité d'explosif :

- La formule empirique en conclusion de ce rapport donne une relation entre la quantité d'explosif et la vitesse particulière,
- Il est possible de relier l'état de contraintes des canalisations à la quantité d'explosif grâce à d'autres relations empiriques données par l'AGA.

Afin d'avoir une formule générale pour toutes les canalisations, on prend le cas le plus pénalisant, à savoir une canalisation de diamètre 80 mm en catégorie A.

La fréquence de vibrations n'est pas prise en compte dans la définition de ce seuil car la fréquence n'a presque aucune influence pour les canalisations enterrées.

L'extension de ce seuil à des problèmes de vibrations autres que les tirs d'explosifs est conservative.

On conserve ce seuil pour des problèmes de vibration tels que le vibrofonçage, l'enfoncement de pieux, les palplanches, les techniques sans tranchées, etc.

Il faut noter que ce seuil est valable pour tous les diamètres de canalisations, toutes les catégories et toutes les pressions. De plus, il ne tient pas compte des phénomènes de fatigue. Ces simplifications sont compensées par le choix d'une valeur limite relativement faible (50 mm/s) et par une évaluation majorante de la vitesse particulière.

4. BATTAGE ET VIBRO-FONCAGE

4.1. **Les procédés de fonçage des pieux et des palplanches**

4.1.1. Les pieux

- a) Les différents types de pieux :

Suivant leur mode de construction, on distingue principalement 2 types de pieux :

- les pieux foncés : ce sont des pieux préfabriqués, soit en béton armé, soit métalliques ; ils sont enfoncés dans le sol par battage ou par vibrofonçage (cf. figures 1 et 2) ;
- les pieux moulés : après avoir effectué un trou jusqu'à la profondeur désirée, on le remplit avec du béton (armé ou non) ; le pieu est donc fabriqué in situ.

Pour la mise en place de pieux moulés, le trou peut être réalisé par forage. Une deuxième solution consiste à enfoncer dans le sol un tube muni d'une pointe en béton (ou en fonte) à sa base, en utilisant les techniques habituelles de battage ou de vibrofonçage. Le tube est ensuite retiré et le trou est rempli de béton.

Le GSF s'applique aux vibrations générées dans le cas des pieux forcés et aussi à celles générées par la construction de pieux moulés avec le deuxième procédé décrit, qui comprend une phase de fonçage de tubes.

b) Le fonçage des pieux :

Il existe deux grandes classes de techniques pour enfoncer les pieux dans le sol :

- techniques de battage : l'enfoncement est produit par l'impact d'une masse sur la tête du pieu (cf. figure 1). Cette masse frappante peut être en chute libre ou être actionnée par de la vapeur, de l'air comprimé, un fluide en pression, etc...

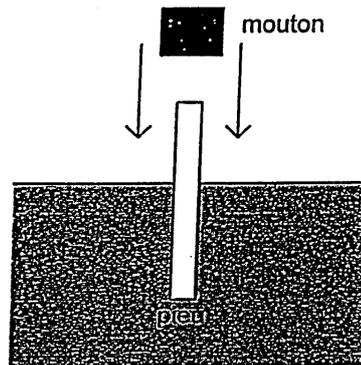


Figure 1 : Le battage des pieux

- techniques de vibrofonçage : les vibreurs ou vibro-fonçeurs sont des engins qui communiquent des vibrations énergiques aux éléments à foncer (ou à arracher), auxquels ils sont rigidement solidarités. Ces appareils sont constitués par deux arbres parallèles équipés de balourds tournant en sens opposé. Les composantes horizontales des forces d'inertie centrifuges s'annulent, tandis que les composantes verticales s'ajoutent et produisent les vibrations (cf. figure 2).

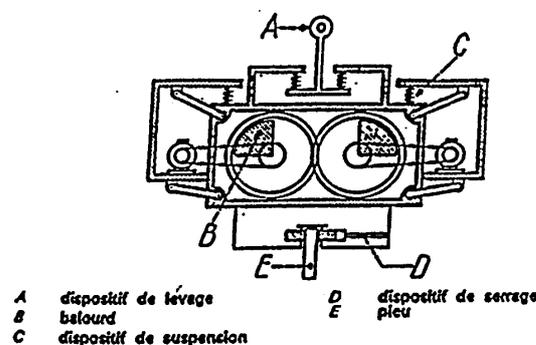


Figure 2 : Vibrofonçeur

4.1.2. Les palplanches

a) Rôle des palplanches :

L'emploi des palplanches dans les ouvrages est très diversifié. Les rideaux obtenus par assemblage des palplanches les unes aux autres, grâce au système de joints ou d'agrafes dont elles sont dotées, peuvent :

- constituer des batardeaux en rivière, permettant la construction des ouvrages à l'abri de l'eau,
- réaliser directement des ouvrages définitifs : quais, écluses, caissons de fondations, protections de berges, murs de soutènement,
- établir des écrans d'étanchéité provisoires ou définitifs,
- assurer des blindages de fouilles.

Les rideaux qu'elles constituent sont assimilables à des murs ou des parois supportant la poussée des terres en place ou des remblais, et des dénivelés d'eau.

b) Les différents types de palplanches :

Les palplanches en bois ou en béton armé sont aujourd'hui abandonnées. Différentes formes de palplanches en acier peuvent être utilisées :

- les palplanches à module ou à inertie : leur section est généralement en forme de U, Z, ou S ;
- les palplanches plates.

c) Le fonçage des palplanches :

Le fonçage des palplanches est réalisé à l'aide du même matériel que pour les pieux.

4.2. Description des vibrations générées

4.2.1. Vibrations dues au battage

L'impact du mouton sur la tête de l'élément battu engendre une onde de compression dans celui-ci. Cette onde se propage jusqu'à la pointe du pieu ou de la palplanche. Lors de ce trajet, une partie de l'énergie initiale est dissipée à cause du frottement sur les parois latérales de l'élément battu. Le frottement latéral est lui-même à l'origine d'ondes de cisaillement dans le sol environnant. En parvenant à l'extrémité, une partie de l'onde de compression dans l'élément battu produit l'enfoncement de celui-ci dans le sol et l'autre partie se réfléchit. Il y a alors émission d'ondes de volume (ondes de compression (P) et ondes de cisaillement (S)) dans le terrain par la pointe (cf. figure 3).

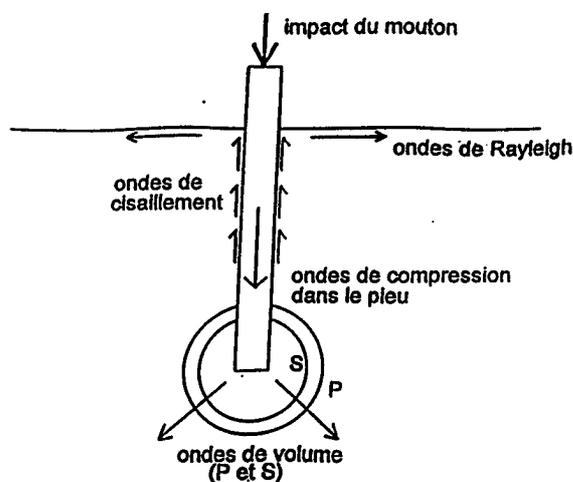


Figure 3 : Vibrations mises en jeu au cours du battage

En résumé, l'énergie incidente (produite par le choc du mouton) se répartit entre :

- des ondes de compression transitoires dans le pieu ou la palplanche,
- la dissipation par frottement latéral,
- la création de déformations plastiques permanentes dans le sol (enfoncement),
- l'émission d'ondes dans le milieu environnant.

Les vibrations du sol générées par le battage sont de type transitoire pour les cadences de frappe faibles (moins de 100 coups/min environ). Le temps entre deux impacts successifs est alors suffisant pour que les trains d'ondes correspondants ne se superposent pas. Cependant, pour des fréquences de travail plus élevées, il peut apparaître des vibrations de type pseudo-stationnaires, pour lesquelles il se produit un chevauchement partiel des trains d'ondes.

4.2.2. Vibrations dues au vibrofonçage

L'intérêt majeur de la technique de vibrofonçage réside dans le fait que la mise en vibration de l'élément à foncer permet de diminuer le frottement latéral et donc d'atteindre une plus grande efficacité dans les travaux.

Les vibrations générées par le vibrofonçage sont de type stationnaire. Les fréquences de travail varient en général entre 1000 et 3000 coups/min. Le signal observé à proximité de la source de vibrations est une onde d'amplitude et de forme constantes.

La nature des vibrations du vibrofonçage est donc différente de celles du battage. Les amplitudes observées dans ces deux situations sont comparables, mais il s'agit dans un cas de vibrations entretenues et à fréquence imposée par le vibro-fonçeur (ce qui peut poser notamment des problèmes de résonance). Les dommages potentiels sont donc plus importants dans le cas du vibrofonçage. C'est pourquoi certains auteurs ont proposé des seuils de vibrations admissibles plus sévères dans cette situation.

4.2.3. Propagation des vibrations

De façon général, il existe deux types principaux d'ondes : les ondes de surface (de Rayleigh) et les ondes de volume (ondes de compression ou ondes P, et ondes de cisaillement ou ondes S). Le plus souvent, on considère que la majeure partie des vibrations ressenties aux environs de la source est due aux ondes de Rayleigh. En fait, la répartition réelle de l'énergie semble plus complexe et plus variable dans le cas du fonçage. Il est inutile de rechercher une description très précise ; une méthode d'estimation raisonnable, pratique et conservatrice est suffisante. Dans l'état actuel des connaissances, la propagation des vibrations générées par le fonçage est décrite en terme de vitesse particulière.

4.3. Tenue mécanique des canalisations enterrées aux vibrations générées par le battage ou vibrofonçage

4.3.1. Relation empirique de Attewell-Farmer

Des mesures de vitesse particulière réalisées sur plusieurs chantiers de fonçage ont permis à Attewell et Farmer de donner la loi empirique suivante :

$$V \leq 1,5 \frac{\sqrt{E}}{D}$$

avec : V = vitesse particulière (mm/s)
E = énergie mise en jeu (J)
D = distance de la source de vibration (m)

Le domaine de validité est défini à partir des cas pris en compte pour l'établissement de cette relation. Toutefois, l'analyse réalisée en annexe 1 montre que ce domaine peut être élargi en énergie et étendu au vibrofonçage. En définitive ce domaine de validité sera :

- énergie : $1\ 000 \leq E \leq 313\ 000$ J
- distance : $1\ \text{m} \leq D \leq 40$ m

Ce domaine de validité est identique pour le module Foncavib de l'outil RAMCES

Dans le cas du vibrofonçage, l'énergie E est calculée de façon suivante (cf. annexe 1) :

$$E_{\text{vibrofonçage}} = \frac{P}{n}$$

avec : P = puissance totale du vibrofonceur (W)

n = fréquence du vibrofonceur (Hz) ou nombre de cycles par seconde

4.3.2. Distance de sécurité

A l'aide de la loi ci-dessus, il est possible de calculer pour une énergie donnée, une *distance de sécurité*. Au-delà de cette distance, on peut assurer que la vitesse particulaire est inférieure à 50 mm/s, c'est-à-dire que le niveau de vibration est acceptable. En revanche, en dessous de cette distance, il y a un risque de dépasser 50 mm/s. Cette relation a été traduite sous forme de tableau et de courbe dans l'annexe 1. De plus, l'outil RAMCES propose un module FONCAVIB afin de déterminer précisément les valeurs : afin de calculer une distance de sécurité, il faudra fournir impérativement soit l'Energie de l'appareil (J) soit le couple Puissance (W) + fréquence (Hz).

Lorsque le fonçage semble être trop puissant (c'est-à-dire si la canalisation se trouve dans la zone où V peut être supérieure à 50 mm/s) ou si E > 313 kJ, la démarche à suivre doit être définie au cas par cas.

Des tassements consécutifs aux vibrations peuvent apparaître au voisinage immédiat des pieux et des palplanches. Ce type de sollicitations n'est pas pris en compte et il peut être plus dangereux que les vibrations. C'est pourquoi un suivi particulier pourra être nécessaire, en particulier dans le cas où la canalisation est très proche des éléments foncés.

NOTA : dans le cas du vibro-fonçage, il est aussi possible d'évaluer l'Energie produite par l'appareil à l'aide de la formule suivante : Energie (J) = Force centrifuge (N) X amplitude (m).

5. COMPACTAGE DYNAMIQUE

5.1. Principe

Le compactage est un procédé qui permet d'améliorer les caractéristiques mécaniques d'un sol. Le principe est de tasser le sol sur l'ensemble de la surface à traiter. La capacité portante du sol est ainsi augmentée de façon significative et il est ensuite possible de construire sur le lieu en question.

Suivant le niveau de compactage recherché, différentes méthodes peuvent être utilisées, dont le compactage dynamique, appelé aussi compactage par masse tombante ou pilonnage dynamique. Une masse de plusieurs tonnes (généralement entre 5 et 20 tonnes) est lâchée d'une hauteur pouvant atteindre 30 mètres ; les impacts de cette masse sur le sol produisent le tassement.

Ces impacts doivent suivre un plan précis et sont espacés régulièrement. Pour parvenir au résultat désiré, plusieurs passages, souvent séparés de plusieurs semaines, sont en général nécessaires. En raison des nombreuses difficultés rencontrées pour modéliser correctement le compactage et surtout le comportement dynamique du sol, les connaissances sur le sujet restent aujourd'hui encore en grande partie empiriques.

5.2. Tenue mécanique des canalisations enterrées aux vibrations générées par le compactage dynamique

5.2.1. Caractéristiques générales des vibrations du compactage

Les vibrations engendrées par le compactage dynamique sont assez importantes ; c'est pourquoi la plupart des chantiers ont été équipés de capteurs permettant de connaître les fréquences, les vitesses particulières et les amplitudes à différentes distances des points de chute du pilon. Ceci a permis de mettre en évidence certains points intéressants :

- Les fréquences des vibrations causées par le pilonnage varient entre 2 et 12 Hz (la valeur la plus courante est de 3 à 4 Hz),
- A 30 m du point d'impact, les vitesses particulières verticales et horizontales restent inférieures à 50 mm/s,
- Le train d'ondes se compose en général de 3 à 6 oscillations d'amplitude quasi constante.

Grâce à ces mesures, il a été aussi possible d'obtenir des relations empiriques en ce qui concerne le niveau de vibration atteinte en fonction des grandeurs du compactage. Des paramètres déterminants pour la vitesse particulière maximale sont :

- la masse M utilisée,
- la hauteur H de chute de la masse,
- la distance D de l'impact au point de mesure.

5.2.2. Relation de Mayne, Jones et Dumas

On présente dans la suite une approche basée sur des résultats de mesures effectuées lors de travaux de compactage. Plusieurs lois empiriques permettant de calculer la vitesse particulière maximale V ont été proposées, sous des formes assez similaires. Cependant on retient celle de Mayne Jones et Dumas, qui permet d'avoir une borne supérieure pour V :

$$\text{pour : } \left(\begin{array}{l} 25\text{t.m} \leq M.H \leq 1000\text{t.m} \\ D \geq 2\text{m} \end{array} \right)$$

$$V \leq 70 \cdot \left(\frac{\sqrt{M.H}}{D} \right)^{1,4}$$

avec M en t, H et D en m, V en mm/s

Cette relation a été établie après avoir rassemblé et traité les mesures provenant de 14 chantiers. Les types de sol rencontrés étaient très variés : sables, remblais, débris divers, argiles ... De plus, les sites en question se trouvaient dans des pays et des continents différents. Ainsi il apparaît que la relation donnée ci-dessus a un caractère assez général et est suffisamment conservatrice.

5.2.3. Distance de sécurité

A l'aide de la loi ci-dessus, on peut calculer, pour un compactage donné (c'est-à-dire un produit M.H donné), une distance de sécurité. Au delà de cette distance, on peut assurer que V est inférieure à 50 mm/s, c'est-à-dire que le niveau de vibration est acceptable. En revanche, en dessous de cette distance, il y a un risque de dépasser 50 mm/s. Cette relation a été traduite sous forme de tableau et de courbe dans l'annexe 2. De plus, l'outil RAMCES propose un module COMPACTAGE afin de déterminer précisément les valeurs : afin de calculer une distance de sécurité, il faudra fournir impérativement la masse et la hauteur.

Lorsque le compactage semble être trop puissant (c'est-à-dire si la canalisation se trouve dans la zone où la vitesse particulière V peut être supérieure à 50 mm/s) ou si M.H > 1000 t.m, la démarche à suivre doit être définie au cas par cas.

6. COMPACTAGE

6.1. Fonctionnement d'un compacteur

Le rôle d'un compacteur est de « tasser » un remblai afin d'obtenir une meilleure capacité portante du sol considéré. Selon leur morphologie, leur mode d'action et la longueur de génératrice du cylindre pour les compacteurs vibrants, la norme [NF P 98-736] regroupe les compacteurs en huit groupes (L est la longueur de la génératrice du cylindre vibrant) :

1. compacteurs statiques
2. compacteurs à pneumatiques
3. compacteurs vibrants avec $L > 1.3$ m
4. compacteurs mixtes
5. compacteurs vibrants à pieds avec $L > 1.3$ m
6. compacteurs vibrants avec $L < 1.3$ m
7. pilonneuses
8. plaques vibrantes

Les compacteurs les plus courants sont les compacteurs vibrants (groupes 3, 4, 5 et 6). L'action de compactage résulte alors de l'effet combiné du poids propre du véhicule et des vibrations générées par les rouleaux ou « billes ». Un tel compacteur peut posséder deux cylindres vibrants, ou bien un seul cylindre vibrant à l'avant ou à l'arrière et de simples roues sur l'autre essieu. Les vibrations de ces cylindres sont créées par un système de balourds (ou masses excentriques ou masselottes). Lorsque les balourds tournent, il en résulte une force verticale d'intensité sinusoïdale. La fréquence du signal sinusoïdal est la « fréquence de vibration ». On appelle « moment de l'excentrique » le produit de la masse excentrée par son rayon d'excentration.



Figure 1. Compacteur vibrant $L < 1.3$ m



Figure 2. Compacteur vibrant $L > 1.3$ m



Figure 3. Compacteur vibrant à pieds



Figure 4. Compacteur mixte

Les catégories 1 et 2 peuvent être assimilées à des véhicules classiques. L'action de compactage résulte simplement de l'action de leur poids propre. Ce type d'engins ne présente pas de risque particulier pour la canalisation en dehors de leur masse. Il suffit de prendre en compte les règles établies dans le domaine du « poids des véhicules ».



Figure 5. Compacteur à pneumatiques

Les pilonneuses et les plaques vibrantes sont des engins de petites dimensions, maniés à la main. Le principe de fonctionnement des plaques vibrantes est similaire à celui des compacteurs classiques, mais la surface de contact avec le sol est plus importante puisqu'il s'agit d'une plaque et non d'un cylindre. Les pilonneuses fonctionnent de manière légèrement différente. En effet, la plaque en contact avec le sol ne vibre pas mais elle oscille verticalement avec une course pouvant aller jusqu'à 30 cm. Dans ce cas, le tassement s'effectue donc par percussion et non plus par vibration.



Figure 6. Pilonneuse



Figure 7. Plaque vibrante

6.2. Les classes de compacteurs

Le nombre important de modèles de compacteurs, la diversité des termes techniques utilisés, les classifications existantes à partir de critères différents ont motivé l'établissement d'une norme de classification unique. C'est la norme NF P 98-736.

Les différents compacteurs sont tout d'abord divisés selon les huit groupes présentés dans la partie précédente. Puis au sein de chaque groupe les compacteurs font l'objet d'une classification spécifique. La nomenclature associée est la suivante : deux ou trois lettres représentant le groupe et un chiffre représentant la classe au sein du groupe.

Il en résulte le classement suivant :

1. compacteurs statiques, x dépend de la masse linéique sur la génératrice du cylindre
 - à pied : SPx avec x = 0, 1, 2, 3
 - lisse : Sx avec x = 0, 1, 2, 3
2. compacteurs à pneumatiques, x dépend de la charge par roue : Px avec x = 0, 1, 2, 3
3. compacteurs vibrants avec $L > 1.3$ m, x dépend du produit $(M1/L)\sqrt{AO}$
 - tandems : VTx avec x = 0, 1, 2, 3, 4, 5
 - monocylindre : VMx avec x = 0, 1, 2, 3, 4, 5
4. compacteurs mixtes
 - cylindre vibrant : x dépend du produit $(M1/L)\sqrt{AO}$: VXx avec x = 0, 1, 2, 3, 4, 5
 - train de pneumatiques : x dépend de la charge par roue : Px avec x = 0, 1, 2, 3
5. compacteurs vibrants à pieds avec $L > 1.3$ m, : x dépend du produit $(M1/L)\sqrt{AO}$
 - tandems : VPTx avec x = 0, 1, 2, 3, 4, 5
 - monocylindre : VPMx avec x = 0, 1, 2, 3, 4, 5
6. compacteurs vibrants avec $L < 1.3$ m, x dépend de la masse linéique : PVx avec x = 1, 2, 3, 4
7. pilonneuses, x dépend de la masse
 - vibrante : PNx avec x = 0, 1, 2, 3
 - à percussion : PPx avec x = 1, 2
8. plaques vibrantes, x dépend de la pression statique sous la semelle : PQx avec x = 1, 2, 3, 4

Vis-à-vis de l'interaction avec les canalisations, ces huit groupes peuvent être simplifiés en 3 catégories :

- **Catégorie « véhicules »** (compacteurs statiques et compacteurs à pneumatiques)
- **Catégorie « compacteurs légers »** (compacteurs vibrants avec $L < 1.3$ m, pilonneuses et plaques vibrantes)
- **Catégorie « compacteurs vibrants »** (compacteurs vibrants avec $L > 1.3$ m, compacteurs mixtes et compacteurs vibrants à pieds avec $L > 1.3$ m)

6.3. Description des contraintes générées

Les engins de compactage peuvent présenter trois risques pour les canalisations situées à proximité :

- **Le risque causé par le poids propre du véhicule.** Ce risque correspond simplement à la surcharge que subit la canalisation. Dans le cas d'une surcharge trop importante, un risque d'ovalisation de la canalisation existe. Le risque lié au poids d'un véhicule est bien connu et des règles bien établies existent dans ce domaine, en particulier le GSF-0051.
- **Le risque causé par les vibrations dans le sol.** La plupart des engins de compactage utilisent des vibrations pour compacter le sol de manière plus efficace qu'une simple charge statique. La partie vibrante du compacteur transmet de l'énergie au sol ; celle-ci se propage sous forme d'onde de surface (dites « de Rayleigh ») et d'ondes de volume (de compression (P) et de cisaillement (S)). Lorsque l'onde atteint la canalisation, une vibration est transmise à celle-ci. Les phénomènes vibratoires dans les structures sont complexes et peuvent être très néfastes pour son intégrité.
- **L'augmentation temporaire de la pression interstitielle du sol** engendrée par le compactage, transmise directement à la canalisation. Cependant, une étude du Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement de la région Normandie Centre [CETE1 et CETE2] a montré que l'utilisation de compacteurs à mains à 20cm de la canalisation engendrait des pressions sur la canalisation de l'ordre de 1 ou 2 bar. De plus, aucune pression résiduelle n'a été constatée après la fin du processus de compactage. Ce chargement sera donc négligé devant le phénomène vibratoire.

6.4. Tenue mécanique des canalisations enterrées aux vibrations générées par des compacteurs

6.4.1. Similitudes avec le vibrofonçage

La technologie de vibrofonçage est tout à fait similaire à celle utilisée dans le cas du compactage. Seul l'organe de transmission au sol diffère : une palplanche ou un pieu pour le vibrofonçage et une plaque ou un rouleau pour le compactage. La répartition en ondes de compression et en ondes de cisaillement sera donc différente.

Une étude sur les vitesses particulières engendrées par vibrofonçage a permis d'établir la loi empirique de Attewell-Farmer. cf §4.1.3

Les phénomènes vibratoires mis en jeu étant tout à fait similaire, la relation d'Attewell-Farmer peut être appliquée au cas du compactage par vibrations. En se fixant un seuil de vitesse particulière à 50 mm/s, il suffit donc de connaître l'énergie d'un compacteur pour calculer la distance minimum à appliquer entre le compacteur et la canalisation.

6.4.2. Distance de sécurité

Les engins de compactage peuvent avoir une action néfaste sur les canalisations si une distance minimale de sécurité n'est pas respectée. Le danger peut venir de deux phénomènes : la surcharge due au poids propre de l'engin et les vibrations émises par les compacteurs vibrants. Pour la surcharge due au poids du véhicule, l'utilisateur est renvoyé au GSF-0051 et au module SURPRO du logiciel RAMCES. Ce module est destiné au traitement de ce type de chargement.

Les compacteurs peuvent être classifiés en trois catégories :

- Les compacteurs statiques
- Les compacteurs légers
- Les compacteurs vibrants

Pour les compacteurs statiques, aucune vibration n'est émise par l'engin, on est dans le cas du chargement de type poids du véhicule. L'utilisation de SURPRO est suffisante.

Pour les compacteurs légers, les préconisations sont celles du guide SETRA/LCPC [SETRA] qui fait référence en terme de compactage.

Pour les compacteurs vibrants, l'approche est basée sur le calcul de l'énergie de l'engin et la relation empirique d'Attelwell-Farmer.

Le tableau ci-dessous résume les distances minimales à respecter en fonction de la classe du compacteur, définie dans la norme NF P 98-736. Tout engin de compactage est caractérisé par cette classification ; **cette donnée est exigible par l'exploitant de GRTgaz.**

	SPx, Sx, Px	PVx	PQx	PNx	PPx	VTx, VMx, Vxx, VPTx, VPMx
x = 0	cf SURPRO			0.25 m		1 m
x = 1		0.25 m	0.25 m	0.25 m	0.25 m	2.1 m
x = 2		0.25 m	0.25 m	0.4 m	0.55 m	1.9 m
x = 3		0.25 m	0.4 m	0.4 m		1.5 m
x = 4		0.4 m	0.4 m			1.7 m
x = 5						2.1 m

Tableau de la distance minimale à respecter en fonction de la classe de compacteur

GRTgaz	NOCIVITE DES VIBRATIONS ENGENDREES DANS LES CANALISATIONS ENTERREES PAR LE COMPACTAGE, LE COMPACTAGE DYNAMIQUE, LE BATTAGE ET LE VIBRO-FONCAGE
--------	--

Ces résultats sont intégrés dans le module COMPACTEUR du logiciel RAMCES.

Il est important de noter que les distances calculées dans le tableau ci-dessus ne tiennent compte que du phénomène vibratoire. Il est donc indispensable de compléter ce tableau par un calcul de la charge statique liée au poids de l'engin pour chaque compacteur. Ce calcul peut être fait à l'aide du module SURPRO du logiciel RAMCES.

7. ANNEXE 1 : BATTAGE OU VIBRO-FONCAGE

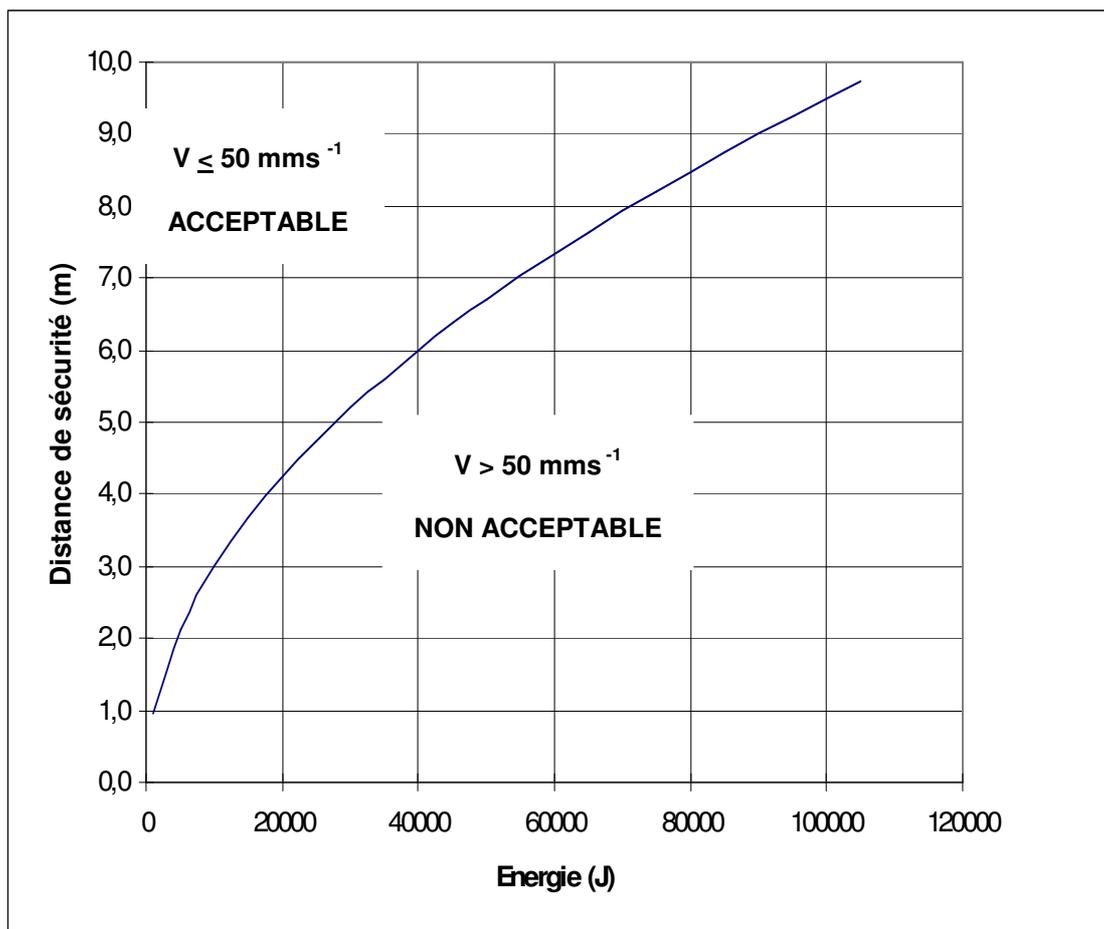
DISTANCE DE SECURITE EN FONCTION DE L'ENERGIE DE BATTAGE OU DE VIBROFONCAGE

Energie (J)	Distance (m)
1000	0,9
5000	2,1
10000	3,0
15000	3,7
20000	4,2
25000	4,7
30000	5,2
35000	5,6
40000	6,0
45000	6,4
50000	6,7
55000	7,0
60000	7,3
65000	7,6
70000	7,9
75000	8,2
80000	8,5
85000	8,7
90000	9,0
95000	9,2
100000	9,5
105000	9,7

Energie (J)	Distance (m)
110000	9,9
115000	10,2
120000	10,4
125000	10,6
130000	10,8
135000	11,0
140000	11,2
145000	11,4
150000	11,6
155000	11,8
160000	12,0
165000	12,2
170000	12,4
175000	12,5
180000	12,7
185000	12,9
190000	13,1
195000	13,2
200000	13,4
205000	13,6
210000	13,7
215000	13,9

Energie (J)	Distance (m)
220000	14,1
225000	14,2
230000	14,4
235000	14,5
240000	14,7
245000	14,8
250000	15,0
255000	15,1
260000	15,3
265000	15,4
270000	15,6
275000	15,7
280000	15,9
285000	16,0
290000	16,2
295000	16,3
300000	16,4
305000	16,6
310000	16,7
315000	16,8

DISTANCE DE SECURITE EN FONCTION DE L'ENERGIE DE BATTAGE OU DE VIBROFONÇAGE



8. **ANNEXE 2 : COMPACTAGE DYNAMIQUE**

DISTANCE DE SECURITE EN FONCTION DE L'ENERGIE DE COMPACTAGE

TABLEAUX

Valeur du produit M.H (en t * m)	Distance de sécurité (en m)
25	6,4
50	9,0
75	11,0
100	12,7
125	14,2
150	15,6
175	16,8
200	18,0
225	19,1
250	20,1
275	21,1
300	22,0
325	22,9
350	23,8
375	24,6
400	25,4
425	26,2
450	27,0
475	27,7
500	28,4

Valeur du produit M.H (en t * m)	Distance de sécurité (en m)
525	29,1
550	29,8
575	30,5
600	31,1
625	31,8
650	32,4
675	33,0
700	33,6
725	34,2
750	34,8
775	35,4
800	36,0
825	36,5
850	37,1
875	37,6
900	38,2
925	38,7
950	39,2
975	39,7
1000	40,2

DISTANCE DE SECURITE EN FONCTION DE L'ENERGIE DE COMPACTAGE

GRAPHIQUE

