



**C.A.PRO.GA.**  
**La Meunière**

**190-bis Rue Paul Doumer  
46200 MONTARGIS**

**Site de Saint-Hilaire-sur-Puiseaux  
Silo de stockage de céréales  
Protection contre les explosions  
Mémoire d'études du 27 Juillet 2020**

**Gérard HEURGUÉ - Ingénieur Conseil**  
**Technologies et Procédés des Industries Agro-alimentaires**  
**58 Rue du Grand Faubourg 28000 CHARTRES – tél : 33 (0)2 37 23 70 75 – 33 (0)6 09 66 47 18**  
**[g.heurgue@orange.fr](mailto:g.heurgue@orange.fr)**  
**SIRET 331 288 357 00071**

# 1 Généralités

La présente étude a été faite sur les bases de la Norme NF EN 14491 de Novembre 2012

*Les premières normes pour le calcul de décharge des explosions dans les silos ont été établies à partir d'une approche très conservatrice. Une application stricte conduisait à des solutions irréalistes parce que la surface disponible en partie haute des silos était souvent inférieure à la surface de décharge calculée. La norme EN14491 révisée en Août 2012, tient maintenant compte de la méthode de remplissage des silos. Il en résulte des surfaces calculées nettement plus réalistes.*

Cette étude comprend la réalisation des notes de calcul des événements d'explosion pour les ouvrages suivants:

- ; Cellules de stockage
- . Tour de manutention
- . Boisseaux de chargement
- . Galeries sur silos

## 1.1 Paramètres pris en compte pour les calculs

Les paramètres d'explosibilité retenus sont la pression maximum d'explosion (**P<sub>max</sub><sup>2</sup>**) et le coefficient maximal d'explosibilité (**K<sub>st</sub><sup>3</sup>**) qui sont les deux paramètres qui interviennent dans les calculs de dimensionnement d'événements.

La liste récapitulative des valeurs K<sub>st</sub> et P<sub>max</sub> donnée par **NFPA 61 (version 2002)** est reprise dans le tableau ci-joint.

| Produit               | K <sub>st</sub><br>(bar.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> ) | P <sub>max</sub><br>(bar) |
|-----------------------|--|---------------------------|
| Blé                   | 112  | 9.3                       |
| Farine de blé         | 139  | 9                         |
| Amidon                | 130  | 10                        |
| Malt                  | 170  | 7.5                       |
| Maïs                  | 47   | 6.2                       |
| Graines Tournesol     | 92   | 7.8                       |
| Luzerne               | 94   | 6.7                       |
| Sucre blanc           | 154  | 8.4                       |
| Pellets de betteraves | 30   | 6                         |
| Lin                   | 17   | 6                         |

Nous prendrons pour les calculs les valeurs suivantes:

**K<sub>st</sub>                    112,0**

**P<sub>max</sub>                    9,3**

## 2 Cellules de stockage de 2600 m3

### 2.1 Caractéristiques des silos

Les grandes cellules de stockage seront construites en métal type plaplanches.

Secton carrée au sol de 12.50 m x 12.50 m

Chaque cellule est indépendante avec toiture métallique.

### 2.2 Calcul des événements

La méthode retenue sera celle de la norme NFPA68 , volume de 0 à 10000 m3.

|                               |        |
|-------------------------------|--------|
| . Section carrée              | 156,25 |
| . Capacité totale en m3       | 2600   |
| . Capacité de stockage tonnes | 1950   |

|   |         |              |
|---|---------|--------------|
| Pression maximale atteinte en bar                                   | Pmax    | 9,3          |
| Indice d'explosion pour les céréales                                | Kst     | 112          |
| Volume de l'enceinte  | V       | 2600         |
| Pression d'explosion réduite bar                                    | Predmax | 0,1          |
| Pression maximale événement bar                                     | Pstat   | 0,08         |
| Elancement du silo  | L/D     | 1,12         |
| (Pmax-Pred)/Pred  |         | 92           |
| Racine H34  |         | 9,59         |
| <b>Surface d'évent AE = X ( L/D inférieur à 2) en m<sup>2</sup></b> |         | <b>38,06</b> |

La toiture de chaque cellule considérée éventable est supérieure à 100 m<sup>2</sup>

### Détermination de l'énergie de l'explosion de poussières

Calcul de BRODE pour l'énergie et indice multi énergie pour les effets de pression.

Explosion en volume éventé

|                  |  |
|------------------|--|
| E joules         | $3 \times V \times (P_{ex} - P_{atm})$ |
| V m3             | 2600                                   |
| Pred max pascals | 10000                                  |
| E en joules      | 78000000                               |

### 2.3 Effets sur l'environnement

Seule une explosion primaire est à retenir , les cellules sont indépendantes

| Détermination des effets de surpression | Verticale | Au sol        |
|---|-----------|---------------|
| Distance de référence 300 mbars en m.   | 11,26     | Pas de valeur |
| Distance de référence 200 mbars en m.   | 12,87     | Pas de valeur |
| Distance de référence 140 mbars en m.   | 20,11     | Pas de valeur |
| Distance de référence 50 mbars en m.    | 44,24     | 39,95         |
| Distance de référence 20 mbars en m.    | 88,47     | 86,41         |

### 2.4 Projections

Les projections sont incalculables, les événements seront articulés et fixés aux structures

### 3 Cellules de stockage de 420 m3

#### 3.1 Caractéristiques des boisseaux de chargement

Les cellules de stockage seront construites en métal type plaplanches.

Secton carrée au sol de 5,20 m x 5,20 m

Chaque cellule est indépendante avec plancher métalliques étanche

#### 3.2 Calcul des événements

La méthode retenue sera celle de la norme NFPA68 , volume de 0 à 10000 m3.

|                               |           |
|-------------------------------|-----------|
| . Section carrée              | 24,06     |
| . Hauteur du fut en m         | 17,65     |
| . Hauteur utile du fut        | 16,4      |
| . Capacité du fut en m3       | 394,584   |
| . Capacité du cône inférieur  | 21,654    |
| . Capacité cône supérieur     | 10,025    |
| . Capacité totale en m3       | 426,263   |
| . Capacité de stockage tonnes | 319,69725 |

|   |         |             |
|---|---------|-------------|
| Pression maximale atteinte en bar                       | Pmax    | 9,3         |
| Indice d'explosion pour les céréales                    | Kst     | 112         |
| Volume de l'enceinte                                    | V       | 426,263     |
| Pression d'explosion réduite                            | Predmax | 0,2         |
| Pression maximale événement                             | Pstat   | 0,1         |
| Elancement du silo                                      | L/D     | 1,12        |
| (Pmax-Pred)/Pred  |         | 45,5        |
| Racine H34  |         | 6,75        |
| <b>Surface d'évnt AE = X ( L/D inférieur à 2) en m²</b> |         | <b>7,11</b> |

IL faut prévoir 7,5 m² par cellule

**Chaque cellule sera équipée de deux évnts de 3,8 m² soit 7,60m² pae cellules**

#### Détermination de l'énergie de l'explosion de poussières

Calcul de BRODE pour l'énergie et indice multi énergie pour les effets de pression.

Explosion en volume éventé

|                  |  |          |
|------------------|--|----------|
| E joules         | $3 \times V \times (P_{ex} - P_{atm})$ |          |
| V m3             | 426,263                                |          |
| Pred max pascals |  | 20000    |
| E en joules      |  | 25575780 |

#### 3.3 Effets sur l'environnement

| Détermination des effets de surpression | Verticale | Au sol        |
|---|-----------|---------------|
| Distance de référence 300 mbars en m.   | 7,79      | Pas de valeur |
| Distance de référence 200 mbars en m.   | 8,91      | Pas de valeur |
| Distance de référence 140 mbars en m.   | 13,92     | Pas de valeur |
| Distance de référence 50 mbars en m.    | 30,62     | <b>24,01</b>  |
| Distance de référence 20 mbars en m.    | 61,24     | 58,21         |

#### 3.4 Projections

Les projections sont incalculables, les événements seront articulés et fixés aux structures

## 4 Tour de manutention

### 4.1 Caractéristiques de la tour de manutention

La tour de manutention sera construite en béton armé.

Tous les planchers de cet ouvrage seront construits en béton armé

Une communication de 10 m<sup>2</sup> reste libre entre chaque plancher.

Pour la protection de cette tour, nous considérons deux parties distinctes.

; Du niveau - 6,70 m au niveau 15.00 m

. Du niveau 15.00 au niveau 36,00 m.

### 4.2 Du niveau - 6,70 au niveau 15.00

La méthode retenue sera celle de la norme NFPA68 , volume de 0 à 10000 m3.

|                         |        |
|-------------------------|--------|
| . Section               | 56     |
| . Hauteur du volume     | 21,7   |
| . Capacité totale en m3 | 1215,2 |

|  |         |              |
|--|---------|--------------|
| Pression maximale atteinte en bar          | Pmax    | 9,3          |
| Indice d'explosion pour les céréales       | Kst     | 112          |
| Volume de l'enceinte                       | V       | 1215,2       |
| Pression d'explosion réduite               | Predmax | 0,2          |
| Pression maximale évent                    | Pstat   | 0,1          |
| (Pmax-Pred)/Pred                           |         | 45,5         |
| Racine H34                                 |         | 6,75         |
| <b>Surface d'évent AE en m<sup>2</sup></b> |         | <b>15,59</b> |

Il est prévu de réaliser à chaque niveau de la tour une surface de 8 m<sup>2</sup>

**Soit une surface totale pour ce volume une surface d'évent de 24 m<sup>2</sup>**

#### Détermination de l'énergie de l'explosion de poussières

Calcul de BRODE pour l'énergie et indice multi énergie pour les effets de pression.

Explosion en volume éventé

|                  |  |          |
|------------------|--|----------|
| E joules         | $3 \times V \times (P_{ex} - P_{atm})$ |          |
| V m3             | 1215,2                                 |          |
| Pred max pascals |  | 20000    |
| E en joules      |  | 72912000 |

#### Effets sur l'environnement

| Détermination des effets de surpression | Verticale | Au sol        |
|---|-----------|---------------|
| Distance de référence 300 mbars en m.   | 11,01     | Pas de valeur |
| Distance de référence 200 mbars en m.   | 12,59     | Pas de valeur |
| Distance de référence 140 mbars en m.   | 19,66     | Pas de valeur |
| Distance de référence 50 mbars en m.    | 43,26     | <b>38,87</b>  |
| Distance de référence 20 mbars en m.    | 86,53     | 84,41         |

#### Projections

Les projections sont incalculables, les événements seront articulés et fixés aux structures

**4.2 Du niveau 15,00 au niveau 36,00 m.**

La surface totale des parois de cette partie est de 903 m<sup>2</sup>

**Surface d'événements obligatoire : 25 % x 903 = 225,75 m<sup>2</sup>**

**Il sera prévu 5 panneaux de 46,25 m<sup>2</sup>, soit 231,25 m<sup>2</sup>.**

La méthode retenue sera celle de la norme NFPA68 , volume de 0 à 10000 m<sup>3</sup>.

|                                     |      |
|-------------------------------------|------|
| . Section intérieure                | 120  |
| . Hauteur du volume                 | 21   |
| . Capacité totale en m <sup>3</sup> | 2520 |

|  |              |              |
|--|--------------|--------------|
| Pression maximale atteinte en bar              | Pmax         | 9,3          |
| Indice d'explosion pour les céréales           | Kst          | 112          |
| Volume de l'enceinte                           | V            | 2520         |
| Pression d'explosion réduite                   | Predmax mbar | 0,09         |
| Pression maximale événement                    | Pstat        | 0,05         |
| (Pmax-Pred)/Pred                               |              | 102,3333333  |
| Racine H34                                     |              | 10,12        |
| <b>Surface d'événement AE en m<sup>2</sup></b> |              | <b>37,40</b> |

**Il sera prévu sur la tour une surface éventable de 231 m<sup>2</sup>**

**Avec cette grande surface éventable la pression réduite sera inférieure à 90 mbar**

Détermination de l'énergie de l'explosion de poussières

Calcul de BRODE pour l'énergie et indice multi énergie pour les effets de pression.

Explosion en volume éventé

|                  |  |          |
|------------------|--|----------|
| E joules         | $3 \times V \times (P_{ex} - P_{atm})$ |          |
| V m <sup>3</sup> | 3257                                   |          |
| Pred max pascals |  | 9000     |
| E en joules      |  | 87939000 |

**Effets sur l'environnement**

| Détermination des effets de surpression | Verticale | Au sol        |
|---|-----------|---------------|
| Distance de référence 300 mbars en m.   | 11,71     | Pas de valeur |
| Distance de référence 200 mbars en m.   | 13,39     | Pas de valeur |
| Distance de référence 140 mbars en m.   | 20,92     | Pas de valeur |
| Distance de référence 50 mbars en m.    | 46,02     | <b>41,92</b>  |
| Distance de référence 20 mbars en m.    | 92,05     | 90,06         |

**Projections**

Les projections sont incalculables, les événements seront articulés et fixés aux structures.

## 5 Boisseaux de chargement de 100 m3

### 5.1 Caractéristiques des boisseaux de chargement

Les boisseaux d'expédition inclus dans la tour sont construits en métal

Le volume en eau des grands boisseaux est de 130 m3, d'où une capacité utile de 100 m3.

### 5.2 Calcul des événements

La méthode retenue sera celle de la norme NFPA68 , volume de 0 à 10000 m3.

|   |       |         |             |
|---|-------|---------|-------------|
| . Section   | 14,03 |         |             |
| . Hauteur du fut en m   | 7,1   |         |             |
| . Hauteur utile du fut  | 10    |         |             |
| . Capacité du fut en m3   | 80    |         |             |
| . Capacité du cône inférieur  | 15    |         |             |
| . Capacité cône supérieur   | 5     |         |             |
| . Capacité totale en m3   | 100   |         |             |
| . Capacité de stockage tonnes                                       | 75    |         |             |
| Pression maximale atteinte en bar                                   |       | Pmax    | 9,3         |
| Indice d'explosion pour les céréales                                |       | Kst     | 112         |
| Volume de l'enceinte  |       | V       | 100         |
| Pression d'explosion réduite  |       | Predmax | 0,2         |
| Pression maximale événement   |       | Pstat   | 0,1         |
| Elancement du silo  |       | L/D     | 1,12        |
| (Pmax-Pred)/Pred  |       |         | 45,5        |
| Racine H34  |       |         | 6,75        |
| <b>Surface d'évent AE = X ( L/D inférieur à 2) en m<sup>2</sup></b> |       |         | <b>2,40</b> |

**Il sera prévu 4 m<sup>2</sup> par boisseau**

### Détermination de l'énergie de l'explosion de poussières

Calcul de BRODE pour l'énergie et indice multi énergie pour les effets de pression.

Explosion en volume éventé

|                  |  |         |
|------------------|--|---------|
| E joules         | $3 \times V \times (P_{ex} - P_{atm})$ |         |
| V m3             | 100                                    |         |
| Pred max pascals |  | 20000   |
| E en joules      |  | 6000000 |

### 5.3 Effets sur l'environnement

| Détermination des effets de surpression | Verticale | Au sol        |
|---|-----------|---------------|
| Distance de référence 300 mbars en m.   | 4,83      | Pas de valeur |
| Distance de référence 200 mbars en m.   | 5,52      | Pas de valeur |
| Distance de référence 140 mbars en m.   | 8,63      | Pas de valeur |
| Distance de référence 50 mbars en m.    | 18,98     | Pas de valeur |
| Distance de référence 20 mbars en m.    | 37,95     | 32,85         |

### 5.4 Projections

Les projections sont incalculables, les événements seront articulés et fixés aux structures

## 6 Galerie sur silos

### 6.1 Galerie sur petits silos

La méthode retenue sera celle de la norme NFPA68 , volume de 0 à 10000 m3.

|                         |        |
|-------------------------|--------|
| . Section               | 54,93  |
| . Longueur du volume    | 25,69  |
| . Capacité totale en m3 | 1411,2 |

#### Calcul de l'évent

|  |         |              |
|--|---------|--------------|
| Pression maximale atteinte en bar          | Pmax    | 9,3          |
| Indice d'explosion pour les céréales       | Kst     | 112          |
| Volume de l'enceinte                       | V       | 1411,1517    |
| Pression d'explosion réduite               | Predmax | 0,1          |
| Pression maximale évent                    | Pstat   | 0,05         |
| (Pmax-Pred)/Pred                           |         | 92           |
| Racine H34                                 |         | 9,59         |
| <b>Surface d'évent AE en m<sup>2</sup></b> |         | <b>22,96</b> |

**La toiture d'une surface de 256 m<sup>2</sup> est largement suffisante.**

Détermination de l'énergie de l'explosion de poussières

Calcul de BRODE pour l'énergie et indice multi énergie pour les effets de pression.

Explosion en volume éventé

|                  |  |
|------------------|--|
| E joules         | $3 \times V \times (P_{ex} - P_{atm})$ |
| V m3             | 1411,1517                              |
| Pred max pascals | 10000                                  |
| E en joules      | 42334551                               |

#### Effets sur l'environnement

| Détermination des effets de surpression | Verticale | Au sol        |
|---|-----------|---------------|
| Distance de référence 300 mbars en m.   | 9,20      | Pas de valeur |
| Distance de référence 200 mbars en m.   | 10,52     | Pas de valeur |
| Distance de référence 140 mbars en m.   | 16,44     | Pas de valeur |
| Distance de référence 50 mbars en m.    | 36,16     | <b>30,76</b>  |
| Distance de référence 20 mbars en m.    | 72,32     | 69,77         |

#### Projections

Les projections sont incalculables, les événements seront articulés et fixés aux structures existantes afin d'éviter toutes projections.



**6.2 Galerie sur grandes cellules**

La méthode retenue sera celle de la norme NFPA68 , volume de 0 à 10000 m3.

|                         |       |
|-------------------------|-------|
| . Section               | 17,38 |
| . Longueur du volume    | 25    |
| . Capacité totale en m3 | 434,5 |

**Calcul de l'évent.**

|                                      |         |       |
|--------------------------------------|---------|-------|
| Pression maximale atteinte en bar    | Pmax    | 9,3   |
| Indice d'explosion pour les céréales | Kst     | 112   |
| Volume de l'enceinte                 | V       | 434,5 |
| Pression d'explosion réduite         | Predmax | 0,1   |
| Pression maximale événement          | Pstat   | 0,05  |
| (Pmax-Pred)/Pred                     |         | 92    |
| Racine H34                           |         | 9,59  |
| Surface d'évent AE en m <sup>2</sup> |         | 9,49  |

**La toiture d'une surface de 130 m<sup>2</sup> est largement suffisante.**

Détermination de l'énergie de l'explosion de poussières

Calcul de BRODE pour l'énergie et indice multi énergie pour les effets de pression.

Explosion en volume éventé

|                  |  |
|------------------|--|
| E joules         | $3 \times V \times (P_{ex} - P_{atm})$ |
| V m3             | 434,5                                  |
| Pred max pascals | 10000                                  |
| E en joules      | 13035000                               |

**Effets sur l'environnement**

| Détermination des effets de surpression | Verticale | Au sol        |
|---|-----------|---------------|
| Distance de référence 300 mbars en m.   | 6,24      | Pas de valeur |
| Distance de référence 200 mbars en m.   | 7,13      | Pas de valeur |
| Distance de référence 140 mbars en m.   | 11,14     | Pas de valeur |
| Distance de référence 50 mbars en m.    | 24,51     | <b>15,49</b>  |
| Distance de référence 20 mbars en m.    | 49,02     | 45,19         |

**Projections**

Les projections sont incalculables, les événements seront articulés et fixés aux structures existantes afin d'éviter toutes projections.

## 7 Galerie sous silos

### 7.1 Galerie sous petits silos

La méthode retenue sera celle de la norme NFPA68 , volume de 0 à 10000 m3.

|                         |        |
|-------------------------|--------|
| . Section               | 43     |
| . Longueur du volume    | 25,6   |
| . Capacité totale en m3 | 1100,8 |

#### Calcul de l'évent

|  |         |              |
|--|---------|--------------|
| Pression maximale atteinte en bar          | Pmax    | 9,3          |
| Indice d'explosion pour les céréales       | Kst     | 112          |
| Volume de l'enceinte                       | V       | 1100,8       |
| Pression d'explosion réduite               | Predmax | 0,06         |
| Pression maximale évent                    | Pstat   | 0,05         |
| (Pmax-Pred)/Pred                           |         | 154          |
| Racine H34                                 |         | 12,41        |
| <b>Surface d'évent AE en m<sup>2</sup></b> |         | <b>24,65</b> |

**Les parois soufflables présentent une surface d'environ 200 m<sup>2</sup>**

Détermination de l'énergie de l'explosion de poussières

Calcul de BRODE pour l'énergie et indice multi énergie pour les effets de pression.

Explosion en volume éventé

|                  |  |
|------------------|--|
| E joules         | $3 \times V \times (P_{ex} - P_{atm})$ |
| V m3             | 1100,8                                 |
| Pred max pascals | 6000                                   |
| E en joules      | 19814400                               |

#### Effets sur l'environnement

| Détermination des effets de surpression | Verticale | Au sol        |
|---|-----------|---------------|
| Distance de référence 300 mbars en m.   | 7,16      | Pas de valeur |
| Distance de référence 200 mbars en m.   | 8,19      | Pas de valeur |
| Distance de référence 140 mbars en m.   | 12,79     | Pas de valeur |
| Distance de référence 50 mbars en m.    | 28,14     | <b>20,76</b>  |
| Distance de référence 20 mbars en m.    | 56,29     | 52,99         |

#### Projections

Les projections sont incalculables, les événements seront articulés et fixés aux structures existantes afin d'éviter toutes projections.

### 7.2 Galerie sous grandes cellules

La méthode retenue sera celle de la norme NFPA68 , volume de 0 à 10000 m3.

|                         |        |            |
|-------------------------|--------|------------|
| . Section               | 45     | Deux cotés |
| . Longueur du volume    | 62,5   |            |
| . Capacité totale en m3 | 2812,5 |            |

#### Calcul de l'évent.

|                                      |         |        |
|--------------------------------------|---------|--------|
| Pression maximale atteinte en bar    | Pmax    | 9,3    |
| Indice d'explosion pour les céréales | Kst     | 112    |
| Volume de l'enceinte                 | V       | 2812,5 |
| Pression d'explosion réduite         | Predmax | 0,06   |
| Pression maximale évent              | Pstat   | 0,05   |
| (Pmax-Pred)/Pred                     |         | 154    |
| Racine H34                           |         | 12,41  |

Surface d'évent AE en m<sup>2</sup>

**49,82**

**Les parois représentent une surface d'environ 300 m<sup>2</sup>**

Détermination de l'énergie de l'explosion de poussières

Calcul de BRODE pour l'énergie et indice multi énergie pour les effets de pression.

Explosion en volume éventé

E joules

$$3 \times V \times (P_{ex} - P_{atm})$$

V m<sup>3</sup>

2812,5

Pred max pascals

6000

E en joules

50625000

### **Effets sur l'environnement**

Détermination des effets de surpression

Verticale

Au sol

Distance de référence 300 mbars en m.

9,76

Pas de valeur

Distance de référence 200 mbars en m.

11,16

Pas de valeur

Distance de référence 140 mbars en m.

17,43

Pas de valeur

Distance de référence 50 mbars en m.

38,36

**33,32**

Distance de référence 20 mbars en m.

76,71

74,32

### **Projections**

Les projections sont incalculables, les événements seront articulés et fixés aux structures existantes afin d'éviter toutes projections.

## 8 Conclusions

### Récapitulatif des effect sur l'environnement

|  | <b>50 mbar</b> |
|--|----------------|
| Cellules de stockage 2600 m <sup>3</sup> | 39,95          |
| Cellules de stockage 430 m <sup>3</sup>  | 24,01          |
| Tour de manutention 0,00 0 à 15,00 m     | 38,87          |
| Tour de manutention 15000 à 39,90 m      | 41,92          |
| Boisseaux chargement 100 m <sup>3</sup>  | Pas de valeur  |
| Galerie sur silos petites cellules       | 30,76          |
| Galerie sur grand silos                  | 15,49          |
| Galerie sous petits silos                | 20,76          |
| Galerie sous grands silos                | 33,32          |

Fait à Chartres le 27 Juillet 2020  
G.HEURGUÉ