



Efectis France
Espace Technologique
Bâtiment Apollo
Route de l'Orme des Merisiers
F-91193 Saint-Aubin
Tél : 33 (0)1 60 13 83 80

**NOTE DE PRINCIPE
STRUCTURE**

Référence : 23-000905b-JVA
Affaire : 23-000974-SA

ETUDES D'INGENIERIE DANS LE CADRE DU DEVELOPPEMENT D'UNE BASE LOGISTIQUE À MONTARGIS (45)

INGENIERIE DU COMPORTEMENT AU FEU DES STRUCTURES :
NOTE TECHNIQUE SUR LES PRINCIPES STRUCTURAUX ET LES ETUDES DE MODE DE RUINE

Client demandeur VALIMMO

Référence et date de commande Bon de commande du 07/03/2023

Projet Base logistique à Montargis (45)

Date : 13 avril 2023
Indice de révision : B
Nombre de pages : 23

Auteur :
Julien VIALE

SUIVI DES MODIFICATIONS

Indice de révision	Date	Modifications
A	06/04/2023	Version initiale.
B	13/04/2023	Mise à jour des surfaces de mezzanines en cellules 6 et 7.

Ce document annule et remplace toutes les versions précédentes

SOMMAIRE

1. Introduction	4
2. Documents de référence	5
2.1. Logiciels de calcul	5
2.2. Documents réglementaires et normatifs.....	5
2.3. Documents fournis par le client	5
3. Présentation du projet	6
3.1. Généralités	6
3.2. Exploitation	7
3.3. Structures porteuses	8
4. Objectifs de sécurité et critères associés aux exigences réglementaires	10
5. Méthodologie associée aux objectifs de sécurité	12
6. Comportement au feu des structures en jeu	13
6.1. Structures en béton	13
6.1.1. Cellules courantes	13
6.1.2. Rappel des phénomènes mis en jeu	13
6.1.3. Recommandations limitant le risque de non respect des objectifs	15
6.2. Structures métalliques des aménagements intérieurs	19
6.2.1. Mezzanines de quai.....	19
6.2.2. Mezzanines de grandes surfaces (mais inférieures à 50%).....	19
6.2.3. Racks automatisés	19
6.2.4. Racks traditionnels	20
6.2.5. Rappel des phénomènes.....	20
6.2.6. Recommandations pour satisfaire les objectifs de résistance au feu des structures intérieures	21
7. Conclusion	23

1. INTRODUCTION

Efectis travaille depuis plusieurs années en partenariat avec les bureaux d'études, constructeurs et donneurs d'ordre pour développer des bases logistiques partout en France.

La société VALIMMO a sollicité Efectis pour réaliser un accompagnement pour le développement d'une base logistique classée sous le régime de l'Autorisation des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement au titre de la rubrique 1510. Le bâtiment situé à Montargis (45) sera composé de 8 cellules en simple RDC dont 6 comporteront une mezzanine de plusieurs étages (notés R+1 et R+2).

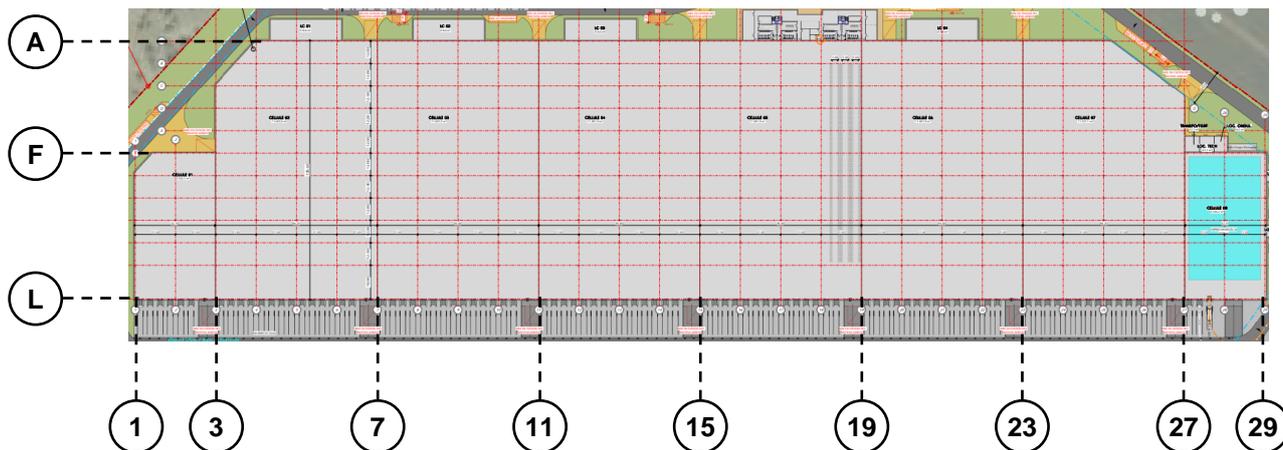


Figure 1-1 : Plan masse du projet

L'accompagnement proposé par Efectis intègre la rédaction de notes techniques portant sur les missions suivantes :

- Grands principes des études de désenfumage ;
- Grands principes des études d'évacuation du personnel ;
- Grands principes des études de mode de ruine des structures ;

Le présent document concerne le dernier volet (études de mode de ruine des structures). Il fait la synthèse des objectifs de sécurité à satisfaire, la méthodologie des études techniques associées ainsi que les grands principes à retenir en phase conception pour maximiser les chances d'atteinte de ces objectifs.

2. DOCUMENTS DE REFERENCE

2.1. LOGICIELS DE CALCUL

- [1] User's manual for SAFIR 2019. A computer program for analysis of structures subjected to fire by J.M. Franssen & T. Gernay - User's manual for SAFIR 2019 – January 2019 ;
- [2] Fire Dynamics Simulator (Version 6), Technical Reference Guide. K.B. McGrattan, H.R. Baum, R.G. Rehm, G.P. Forney, J.E. Floyd, K. Prasad, and S. Hostikka –Technical Report NISTIR 6783, 2007;

2.2. DOCUMENTS REGLEMENTAIRES ET NORMATIFS

- [3] Arrêté du 24 septembre 2020 relatif aux prescriptions générales applicables aux entrepôts couverts soumis à la rubrique 1510 ;
- [4] Arrêté du 11 avril 2017 relatif aux prescriptions générales applicables aux entrepôts couverts soumis à la rubrique 1510 ;
- [5] Arrêté du 29 septembre 2005 relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation ;
- [6] NF EN 1992-1-2 et Annexe Nationale : « Eurocode 2 : Calcul des structures en béton – Partie 1-2 : Règles générales – Calcul du comportement au feu », Octobre 2005 et NF EN 1992-1-2/NA Octobre 2007 ;
- [7] NF EN 1993-1-2 et Annexe Nationale : « Eurocode 3 – Calcul des structures en acier – Partie 1-2 : Règles générales – Calcul du comportement au feu », Novembre 2005 et NF EN 1993-1-2/NA, Octobre 2007 ;
- [8] NF DTU 23.3P3 : « Ossatures en éléments industrialisés en béton - Partie 3 : Règles de calculs » Juin 2008 ;
- [9] P92-701 : « Règles FB : Méthode de prévision par le calcul du comportement au feu des structures en béton » Décembre 1993 ;
- [10] Entrepôts de matières combustibles – Guide d'application de la rubrique 1510 et de l'arrêté ministériel du 11 avril 2017 modifié relatif aux prescriptions générales applicables aux entrepôts couverts soumis à la rubrique 1510, Février 2023 ;

2.3. DOCUMENTS FOURNIS PAR LE CLIENT

- [11] Plan masse, réf : 20230223_Cultura_Plan masse intralog.pptx ;
- [12] Descriptif des zones, réf : 20230303_M2M_Descriptifs zones.xlsx ;
- [13] Présentation intralog, réf : 20220930_presentation intralog – Extract.pdf ;

3. PRESENTATION DU PROJET

3.1. GENERALITES

Le projet de construction consiste en la création d'un entrepôt de dimensions 585 m x 139 m (L x l) avec :

- Au RDC, des cellules de stockage inférieures à 12 000 m², séparées par des parois REI 120 ou 240 (à définir) ;
- Une hauteur au faîtage de 15,5 m pour une hauteur de stockage maximale de 13,70 m ;
- Des mezzanines en R+1 et R+2 au niveau des quais des cellules 2 à 7 sur la longueur du bâtiment et d'une plus grande emprise en cellules 6 et 7 (inférieure à 50% de la surface au sol du RDC).

À noter que le bâtiment comporte le niveau du RDC uniquement. La notion de R+1 et R+2 dans ce rapport désigne uniquement les étages de mezzanines, non pas des niveaux au sens réglementaire des ICPE.

À noter également que la cellule 1 sera dédiée au stockage d'aérosol et de liquides inflammables et sera classée en 4331 et 4321 au régime de l'enregistrement.

Les figures ci-après présentent des vues en plan des étages, les mezzanines étant représentées en orange.



Figure 3-1 : Plan du niveau RDC

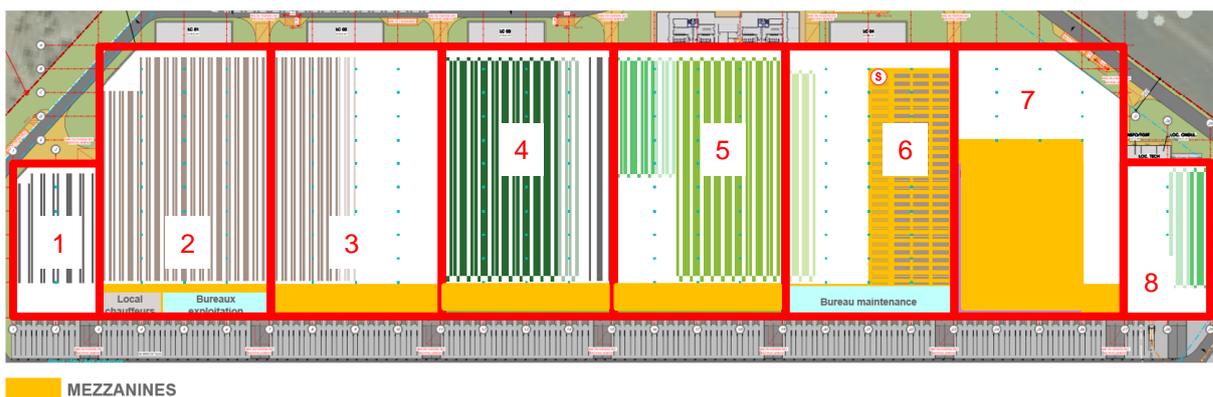


Figure 3-2 : Plan de l'étage R+1 de la mezzanine

Pour les mezzanines de grandes dimensions, leur surface en plan est la suivante (approximativement) :

- Mezzanine cellule 6 : environ 5 800 m², ce qui représente 48% de la surface du RDC de la cellule ;
- Mezzanine cellule 7 : environ 5 500 m², ce qui représente 48% de la surface du RDC de la cellule.

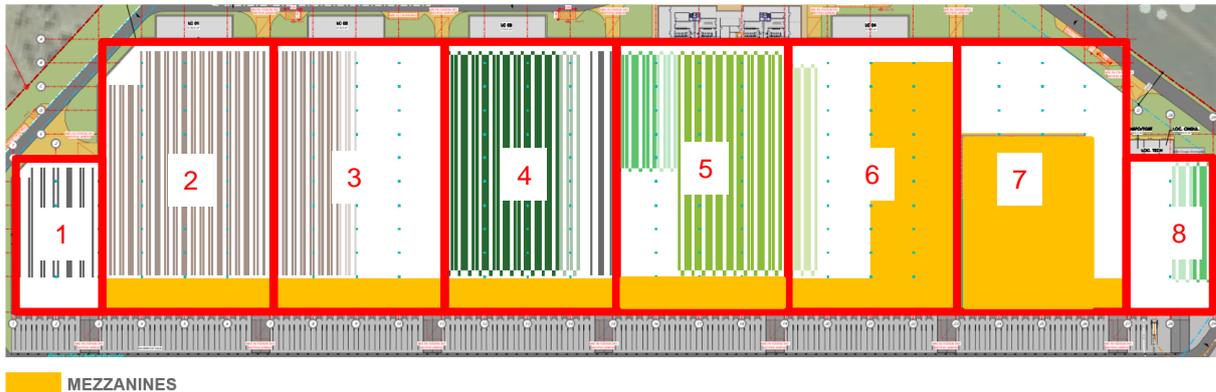


Figure 3-3 : Plan de l'étage R+2 de la mezzanine

3.2. EXPLOITATION

Différentes zones d'exploitation sont définies au sein des cellules. Elles sont détaillées ci-dessous et représentées sur les plans en figure. :

Au niveau RDC, on trouve :

- Zone A : Racks de stockage de produits dangereux (aérosols, LI) avec allées larges de 3,6 m ;
- Zone B : Racks de stockage en allées étroites de 1,8 m de large. Des chariots tridimensionnels (avec ou sans conducteur) circulent dans les allées. Ces zones de stockage peuvent être mécanisées ;
- Zone C : Zone de stockage au sol pour les produits volumineux ;
- Zone D : Zone mécanisée : stockage colis complets en triple profondeur ;
- Zone E : Rack de stockage pour consommables (cartons, sacs de caisse etc) ;
- Zone F : Zone mécanisée : Zone tampon (buffer) des colis d'expédition ;
- Zone G : Zone de palettisation avec des bras mécanisés ;
- Zone H : Zone mécanisée : picking détail en bacs ;
- Zone I : Zone de consolidation des commandes e-commerce provenant des différentes zones (shuttle, Scallog etc.) grâce à un système de rucher d'éclatement manuel avec dépose put-to-light ;
- Zone J : Zone mécanisée : étagères mobiles (Scallog) ;
- Zone K : Zone mécanisée d'éclatement du livre pour les gros volumes
Les livres sont injectés unitairement et automatiquement triés par magasin dans un bac ;
- Zone L : Zone mécanisée : 24 postes d'injection (pocket sorter) ;
- Zone M : Robots permettant d'empiler les bacs en sortie du buffer de bac pour les poser sur une base roulante avant expédition en magasin ;
- Zone N : Zone mécanisée : Zone tampon (buffer) des bacs de livres issus du Pocket Sorter ;
- Zone O : Allée de circulation en face des quais ;
- Zone P : Surface de quais.

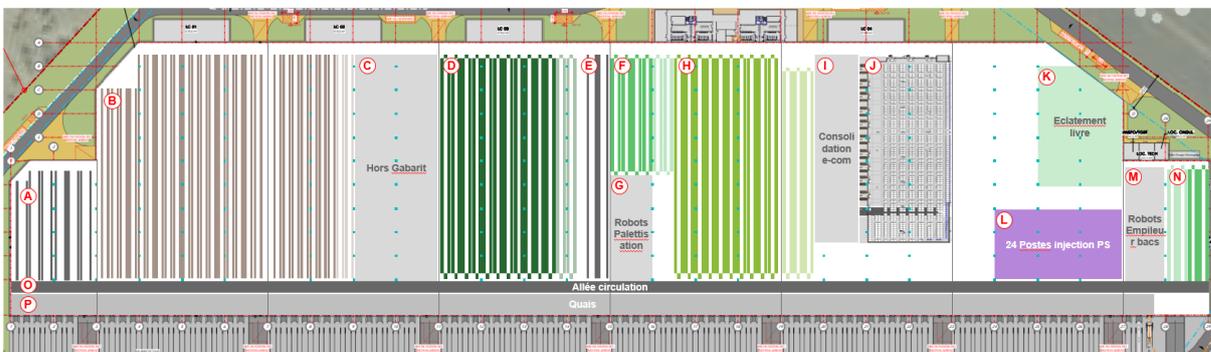


Figure 3-4 : Identification des zones d'exploitation au RDC

Au R+1 des mezzanines :

- Zone Q : Zone mécanisée : 10 stations pour miniload ;
- Zone R : Zone mécanisée : 10 stations pour shuttle ;
- Zone S : Rack de stockage ;

- Zone T : Zone mécanisée : 40 stations de mise en bac.

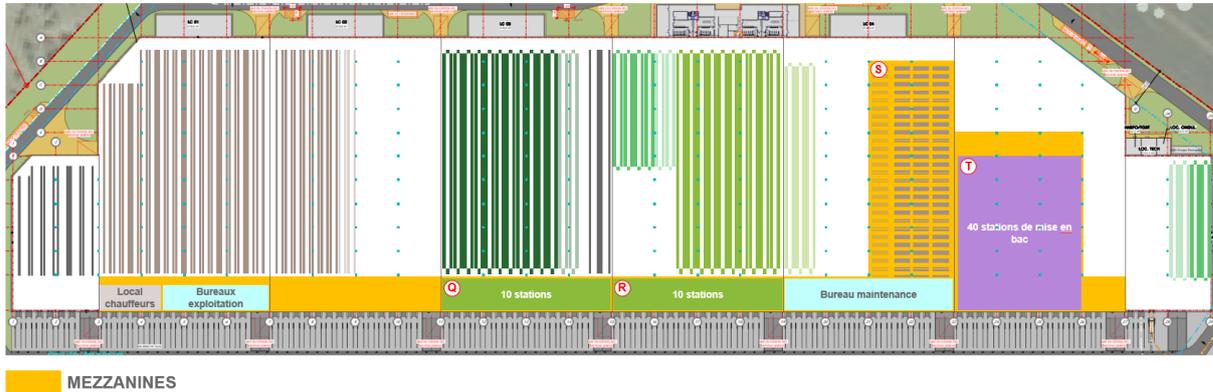


Figure 3-5 : Identification des zones d'exploitation au R+1

Au R+2 des mezzanines :

- Zone U : Zone mécanisée : 10 stations pour shuttle ;
- Zone V : Zone mécanisée pour le tri des livres.

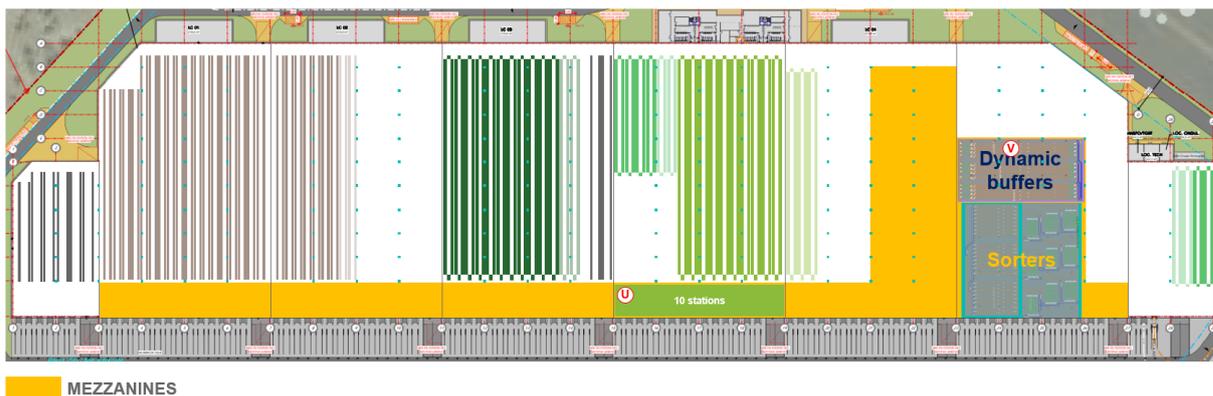


Figure 3-6 : Identification des zones d'exploitation au R+2

3.3. STRUCTURES PORTEUSES

Le détail complet des structures porteuses de l'ouvrage n'est pas complètement connu ni figé compte-tenu de l'avancement du projet. Il est cependant possible de retenir les éléments suivants au regard des informations transmises par le demandeur de l'étude.

- Les structures porteuses sont en béton armé et/ou précontraint.
- La structure porteuse de l'ensemble des niveaux est vraisemblablement basée sur un schéma poteaux/poutres/pannes pour les zones toute hauteur (cellules 1 à 5 et 8).
- Les cellules 6 et 7 comportent des niveaux de mezzanine pour lesquelles les structures porteuses ne sont pas encore arrêtées (dalles pleines ou alvéolaires en béton armé, ou structures aciers).
- Les structures porteuses sont contreventées par encastrement des pieds de poteaux et par la présence de pannes et poutres qui transfèrent les charges horizontales aux poteaux puis aux fondations.
- La structure porteuse des mezzanines au niveau des zones de quais sera métallique et sera directement connectée à la structure béton de l'entrepôt.
- La position des joints de dilatation (JD) n'a pas encore été confirmée par le bureau d'étude (BE) en charge de la conception de la structure. Leur position et nombre seront à préciser dans le sens longitudinal (sens des files numériques : probablement 1 JD par cellule) et dans le sens transversal (sens des files alphabétiques : 1 JD qui découpe en 2 les cellules).
- Les mezzanines (locaux sociaux, bureaux d'exploitation et bureaux de maintenance) au niveau des cellules 2 et 6 seront délimitées par un plancher et murs coupe-feu REI 120 (soit en dalles alvéolaires précontraintes, soit en plancher sur bac acier collaborant).

- Le degré coupe-feu de l'ensemble des murs CF est à minima REI 120 minutes mais peut être augmenté jusqu'à 240 minutes à la suite des études de flux thermiques (FLUMILOG).
- Les trames porteuses des zones courantes sont les suivantes : entraxe des portiques principaux de 12,5m (entraxe des files alphabétiques) et de 17.2 m (entraxe des files numériques).
- Hauteur au faitage de 15.5 m environ.

4. OBJECTIFS DE SECURITE ET CRITERES ASSOCIES AUX EXIGENCES REGLEMENTAIRES

Les études d'ingénierie du comportement au feu des structures ont pour objectif de vérifier si la configuration du bâtiment respecte des niveaux de sécurité satisfaisants vis-à-vis de l'évacuation des personnes et de l'intervention des services de secours.

Les prescriptions techniques associées à respecter en ce qui concerne la résistance au feu des éléments sont décrites dans l'annexe II de l'arrêté du 24 septembre 2020 (dispositions constructives) modifiant l'arrêté du 11 avril 2017. Parmi les dispositions prescrites on retrouve des exigences concernant la structure et notamment ce que l'on peut appeler les modes de ruines de la structure en cas d'incendie. Le paragraphe 4 de l'annexe II de l'arrêté indique :

« Les dispositions constructives visent à ce que la cinétique d'incendie soit compatible avec l'évacuation des personnes, l'intervention des services de secours et la protection de l'environnement. Elles visent notamment à ce que la ruine d'un élément de structure (murs, toiture, poteaux, poutres par exemple) suite à un sinistre n'entraîne pas la ruine en chaîne de la structure du bâtiment, notamment les cellules de stockage avoisinantes, ni de leurs dispositifs de recouplement, et ne conduit pas à l'effondrement de la structure vers l'extérieur de la cellule en feu. »

En termes de résistance au feu des structures, il est donc nécessaire de démontrer que la cinétique de l'incendie est compatible avec l'évacuation des personnes et l'intervention des services de secours et que les principes constructifs retenus évitent la ruine d'éléments de structure vers l'extérieur et la ruine en chaîne des dispositifs de recouplement.

Ces objectifs réglementaires en termes de mode de ruine peuvent être traduits par les exigences fonctionnelles suivantes :

- Critère de non effondrement prématuré : la ruine d'un élément structurel du bâtiment suite à un sinistre est compatible avec l'évacuation des occupants.
- Critère de non ruine en chaîne : la ruine d'un élément structurel du bâtiment suite à un sinistre n'entraîne pas la ruine en chaîne de la structure du bâtiment ou de zones où les conditions sont praticables, ce qui conduirait à des risques pour les personnes à l'intérieur de la zone sinistrée, dans les cellules adjacentes ou pour les tiers dans les potentiels étages. Compte tenu de la conception multiniveaux sur certaines zones, on ne peut toutefois pas exclure de ruine en chaîne au-delà de la durée de stabilité réglementaire du bâtiment.
- Critère de non effondrement vers l'extérieur : La ruine des éléments structurels ne conduit pas à l'effondrement de la structure vers l'extérieur de la cellule en feu, ce qui conduirait à des risques pour les personnels d'intervention au cours de leur lutte à l'extérieur du bâtiment.
- Critère sur le compartimentage : La ruine d'un élément structurel n'entraîne pas la ruine prématurée du dispositif de recouplement (exemple : mur séparatif ou plancher entre deux cellules). Dans le cas des cellules avec planchers intermédiaires, la ruine en chaîne verticale des planchers béton suite à la défaillance d'un(e) plancher/poutre/panne de toiture ne peut être exclue. Par conséquent, la tenue au feu des poutres et pannes devra être ramenée au degré de compartimentage des planchers coupe-feu.

Ces objectifs s'appliquent aussi bien à la structure principale du bâtiment qu'aux structures légères ou aménagements assimilés. Il est rappelé que les cellules 6 et 7 contiennent des mezzanines sur 3 niveaux (RDC, R+1, R+2) et que les cellules 2 à 5 contiennent des mezzanines dites de quais. Les mezzanines (locaux sociaux, bureaux d'exploitation et bureaux de maintenance) au niveau des cellules 2 et 6 seront délimitées par un plancher et murs coupe-feu REI 120.

La structure principale comprend : les poutres, les poteaux, les portiques, les systèmes de contreventement, les éléments d'anti-flambement, les murs et panneaux porteurs, les planchers, les poutres supports et tout autre élément participant à la stabilité de l'ouvrage. Ne font pas partie de la structure les pannes, sauf celles utilisées comme éléments de stabilité ou celles pouvant générer une ruine en chaîne d'autres ouvrages, les remplissages, les cloisons, la couverture et les habillages. Dans le cadre de ce projet, dans la mesure où leur

ruine pourrait entraîner une ruine en chaîne verticale des structures des zones de mezzanines dimensionnées REI 120 (cellules 2 et 6) il sera nécessaire de les considérer comme des éléments de structure principale.

La vérification des critères dépend, entre autres, de la durée d'évacuation du personnel, des conditions de tenabilité dans les volumes, des scénarios de feu envisagés et de la réponse de la structure aux sollicitations thermiques.

La présente note concerne principalement l'ensemble de l'ossature béton des cellules. Mais elle concerne aussi les structures porteuses des mezzanines R120 (cellules 2 et 6).

Des informations sont également données s'agissant des structures indépendantes, notamment les racks automatisés de grande hauteur dans les cellules B et C. On s'attachera dans cette note à présenter les spécificités des phénomènes en jeu vis-à-vis des exigences à vérifier et leurs conséquences sur la conception de la structure.

5. METHODOLOGIE ASSOCIEE AUX OBJECTIFS DE SECURITE

Concernant les objectifs de sécurité présentés au §3 et leurs exigences associées, il convient classiquement de réaliser une étude spécifique permettant la démonstration de leurs atteintes comprenant les étapes suivantes :

1. Identifier les scénarios incendie les plus probables et défavorables dans les cellules vis-à-vis des éléments structuraux.
2. Modéliser ces scénarios avec d'un logiciel CFD (le logiciel FDS [2] par exemple). Cela permettra de déterminer les actions thermiques sur les éléments structurels avec une répartition temporelle et spatiale.
3. Modéliser les éléments de structure de l'entrepôt en deux ou trois dimensions à l'aide du logiciel thermo-élasto-plastique aux éléments finis (le logiciel SAFIR [1] par exemple), en considérant les lois de comportement définies dans l'Eurocode 2 partie 1.2 [6] (pour les structures en béton) et dans l'Eurocode 3 partie 1.2 (pour les structures acier potentielles des mezzanines).
 - Réaliser les calculs de transfert thermique en prenant en compte la nature des éléments structurels et les actions thermiques déterminées précédemment ;
 - Réaliser les calculs de déformation et de résistance de la structure en situation d'incendie afin d'analyser le comportement thermomécanique de la structure et de s'assurer que les critères de performance définis au §3 sont bien vérifiés.

Les objectifs à atteindre et la méthodologie associée aux études ayant été rappelés, il convient alors de procéder à une analyse du risque incendie lié à la configuration géométrique et à l'exploitation de l'ouvrage (stockage toute hauteur sur les cellules 1 à 5 et 8, stockage en R+2 sur les cellules 6 et 8, présence de mezzanines de quais avec et sans compartimentage REI120). Les études techniques approfondies concernant le comportement au feu de la structure porteuse de l'ouvrage pourront quant à elle être réalisées dans une phase ultérieure du projet et pourront faire l'objet d'un rapport d'étude distinct. Ces études dites « études avancées » nécessitent une précision dans les données d'entrée compatibles avec une réalisation une fois les plans d'exécution bien avancés.

6. COMPORTEMENT AU FEU DES STRUCTURES EN JEU

Le présent paragraphe rappelle les principaux phénomènes impactant la structure en cas d'incendie et fournit des recommandations préliminaires vis-à-vis de la configuration réelle de ces structures en béton. Compte-tenu du caractère préliminaire de cette note par rapport à l'avancement du projet, il convient de rappeler que les préconisations formulées restent des grands principes, qui peuvent (et doivent) être revus en phase conception/exécution une fois le dimensionnement des structures en jeu terminés.

6.1. STRUCTURES EN BETON

6.1.1. Cellules courantes

Les structures principales des bâtiments seront vraisemblablement réalisées par ossatures en éléments industrialisés en béton. Les poteaux ont une hauteur d'environ 15,5 m. Ils seront normalement encastés en pieds et espacés de 12 m ou 18 m (espacement des files alphabétiques) et de 17.2 m (espacement des files numériques). Les cellules comportent chacune, a priori, 5 poteaux selon les files longitudinales en trame courante (sauf pour les cellules 1 et 8 qui n'en comportent que 3 du fait de leur dimension en plan plus faibles). Les poteaux au niveau des murs coupe-feu seront, a priori, communs aux cellules adjacentes.

6.1.2. Rappel des phénomènes mis en jeu

La tenue au feu des éléments en béton est principalement assurée par la protection thermique apportée par le béton aux éléments de renforts en acier (enrobage des armatures pour les éléments en béton armé ou des torons pour les éléments en béton précontraint). La capacité portante des éléments décroît lorsque les armatures ou les torons s'échauffent et peut être remise en cause au-delà de 500°C pour les armatures des éléments en béton armé et 350°C pour les torons des éléments précontraints. Concomitamment à ces pertes de capacité portante, l'échauffement des éléments entraîne des variations dimensionnelles importantes des sections générant des dilatations et courbures des éléments.

Ainsi, lorsqu'une structure en béton est soumise à l'incendie, son comportement mécanique peut être schématisé en plusieurs phases distinctes :

- Phase de poussée : Au début de l'incendie, l'échauffement de la structure demeure relativement faible pour ne pas affaiblir de manière significative les caractéristiques mécaniques des éléments. Dans cette première phase, l'augmentation de la température des éléments se traduit principalement par un déplacement vers l'extérieur de la structure exposée au feu et par une augmentation des efforts de poussée sur les parties restées froides. Ce phénomène se poursuit jusqu'à l'apparition des premières ruines d'éléments structuraux (plastification, instabilité de section, rupture d'un assemblage).
- Phase de traction ou ruine des éléments : Lorsque l'échauffement des éléments de structure dans les zones les plus exposées est tel que l'on observe les premières ruines, les efforts transmis à la partie de structure non échauffée passent progressivement d'une force de poussée à une force de traction. Cette phase de traction dépendra principalement du mode de rupture des éléments béton. Dans le cas de rupture brutale ou de ruine des liaisons entre éléments, la phase de traction peut être très brève.

Les figures suivantes illustrent ces phénomènes pour un bâtiment à simple rez-de-chaussée :

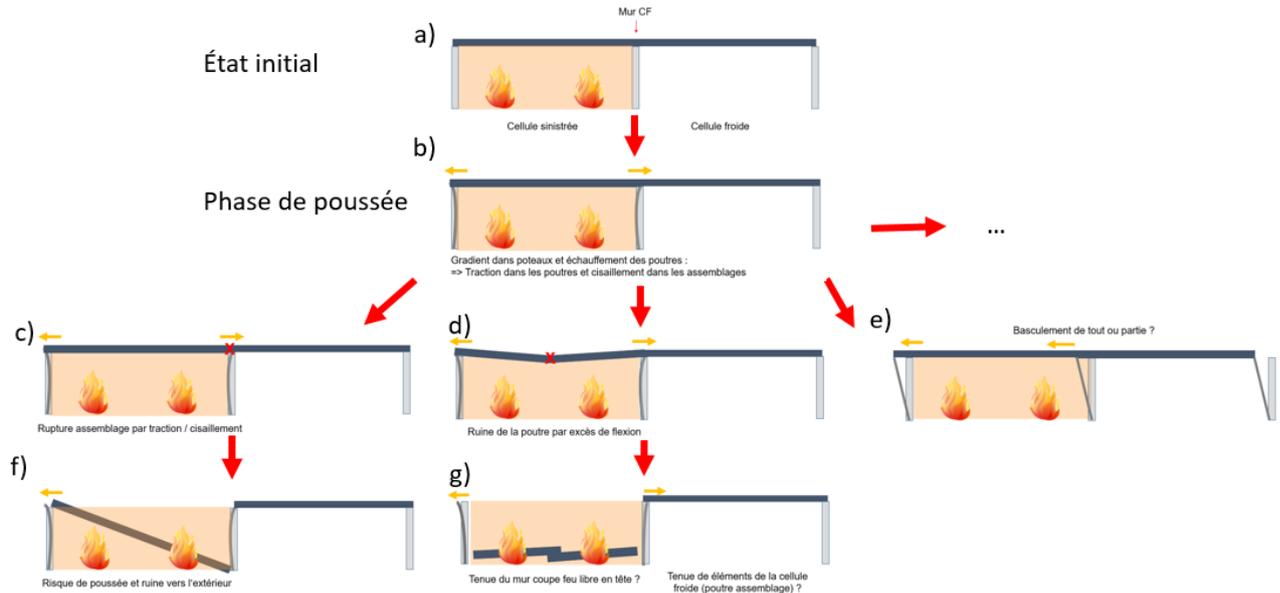


Figure 6-1 : Cinématique de ruine – Dilatation, poussée et ruines possibles

Lorsqu'il y a ruine d'un élément horizontal, si le poteau béton n'a pas été entraîné par la ruine de la poutre, il peut (dans le cas d'un poteau de rive) se retrouver libre en tête, soulagé d'une partie des efforts verticaux (couverture, plancher...) mais pouvant toujours être sollicité par les efforts sur les façades (vent notamment) ou par les effets thermiques (effet bilame notamment). Il convient alors de s'assurer de sa tenue au feu avec ces nouvelles conditions aux limites.

Pour les poteaux mitoyens d'une cellule froide, après rupture de la poutre du coté sinistré, le gradient thermique appliqué au poteau exerce une poussée vers la cellule froide. Afin d'éviter toute ruine en chaîne, il est nécessaire de s'assurer que les efforts de cette poussée peuvent être transférés et repris par les éléments dans la cellule non exposée sans défaillance (poutres, pannes et assemblages notamment).

Il est donc nécessaire que ces phases de poussée liées à la dilatation n'entraînent pas de ruines prématurées d'éléments d'ossature, de désordres sur les murs coupe-feu en périphérie du bâtiment et de risques d'effondrement vers l'extérieur.

Pour les éléments multiniveaux, il peut également exister un risque de perte d'appuis au droit des joints de dilatation des planchers « froids » des niveaux supérieurs ou inférieurs au plancher échauffé du fait de sa dilatation (voir Figure suivante). Ce risque se retrouve également au droit des liaisons ponctuelles des éléments froids (brochage par exemple).

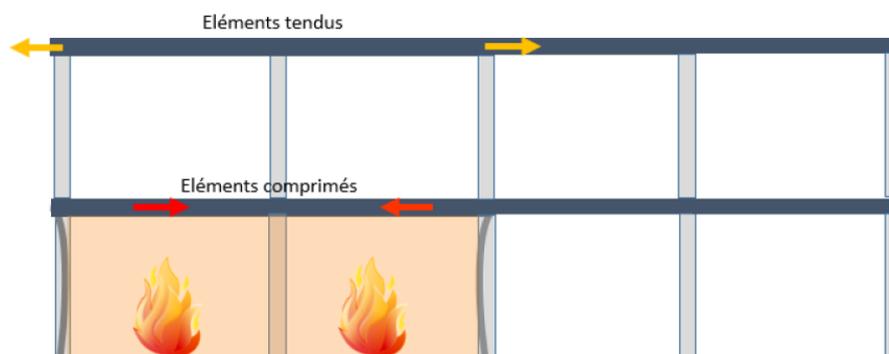


Figure 6-2 : Dilatations différentielles de planchers superposés

Ces exigences peuvent être gérées constructivement en apportant un soin particulier aux attaches afin d'éviter toute ruine en chaîne, en favorisant la ruine des poutres et des planchers avant celle des poteaux et en mettant en œuvre des dispositions limitant les effets de la dilatation (joints de dilatation). Les assemblages entre éléments doivent présenter une résistance suffisante aux efforts mais également des capacités de

déformations importantes. Il est rappelé que les effets bilames dans les poteaux sont de nature à augmenter les efforts dans les liaisons entre éléments.

6.1.3. Recommandations limitant le risque de non respect des objectifs

Comme évoqué précédemment, le degré coupe-feu des potentielles dalles de plancher est REI 120. Par conséquent les poteaux, poutres et plancher devront être à minima stables au feu de degré R120 minutes.

Afin de privilégier une ruine vers l'intérieur de la structure, une solution de conception misant sur une hiérarchisation de la tenue au feu des éléments peut être considérée. Les éléments de rive (poteaux et/ou planchers et pannes) voient alors leur degré de stabilité au feu être augmenté (R180 par exemple, pour la structure en rive de l'entrepôt) par rapport aux éléments situés à l'intérieur du bâtiment (qui gardent un degré de stabilité R120). Cette alternative apporte un surplus de résistance sécuritaire en périphérie, notamment en favorisant la ruine vers l'intérieur, et ce quelle que soit la position du foyer primaire de l'incendie.

Dans le cas où les poteaux sont associés à des parois coupe-feu, ils devront être stables au feu du même degré que le mur associé. La tenue mécanique des poteaux insérés dans les murs coupe-feu devra tenir compte des phénomènes précédemment décrits, notamment de l'effet bilame du gradient thermique.

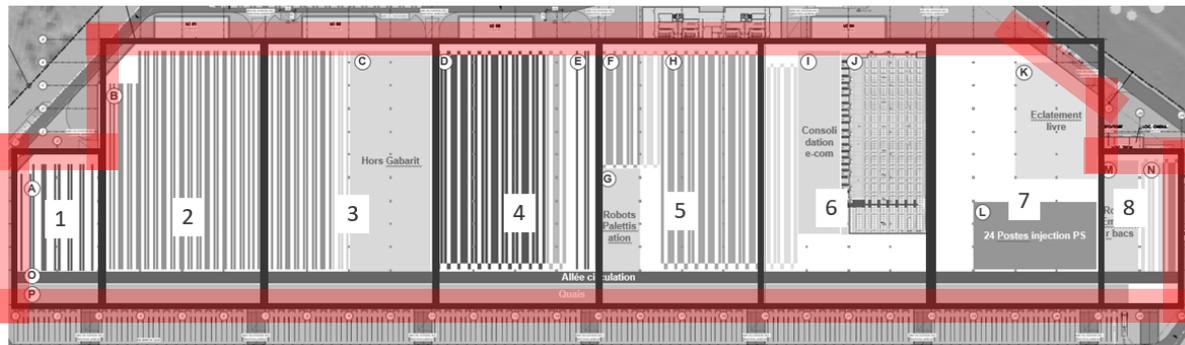


Figure 6-3 : Surdimensionnement des poteaux de rive (en rouge)

Comme décrit dans le paragraphe précédent, un des phénomènes fondamentaux à appréhender pour s'assurer d'un mode de ruine correct du bâtiment, et notamment de son effondrement vers l'intérieur, est la dilatation thermique des éléments horizontaux. En effet, les dimensions des cellules (~130 m x 80 m) vont générer des dilatations importantes en rive des cellules sinistrées, notamment selon leur grande dimension ou selon le sens de portées des poutres et pannes.

Pour les cellules 6 et 7, la dilatation des planchers des différents niveaux potentiels peut générer des poussées sur les zones adjacentes. À titre informatif et afin de mieux apprécier les ordres de grandeur liés à ce phénomène, nous rappelons quelques valeurs, données notamment dans les règles Feu-Béton [9] pour des planchers en béton (document qui n'est actuellement plus applicable mais permettant de préciser les ordres de grandeur des dilations mises en jeu). Ce document ne donne pas d'information pour les poutres et pannes, tant leur dilatation dépend de leurs caractéristiques (section, ferrailage). Toutefois, les dilatations de ces éléments sont souvent 2 à 3 fois supérieures à celles obtenues pour les planchers.

Sollicitations dues aux effets de dilatation d'ensemble :

- La dilatation d'un élément est calculée à partir du coefficient de dilatation linéaire d'environ 10^{-5} m/m et de la température moyenne atteinte par cet élément après une durée au feu fixée par le critère d'exigence requis. Les valeurs suivantes peuvent être admises :

SF	1/2h	1h	1h1/2	2h	3h
Plancher exposé 1 face	100°C	200°C	300°C	350°C	450°C
Dilatation linéaire associée	1 mm/m	2 mm/m	3mm/m	3,5mm/m	4,5mm/m

Tableau 6-1 : Dilatation des planchers soumis au feu

Les variations dimensionnelles des éléments seront calculées conformément aux référentiels en vigueur (NF EN 1992-1-2 [6] notamment). En fonction de la dilatation thermique maximale des différents éléments

composant la structure horizontale (ici poutres, pannes, potentielles dalles alvéolées et structure aciers connectés aux structures béton), des dispositions constructives seront à mettre en place afin de limiter les poussées sur les files de rive (joints permettant de dissiper une partie de ces déplacements). À noter que pour des dalles alvéolées précontraintes, la dilatation dans le sens de la portée de ces éléments (sens des torons) est fortement réduite par la précontrainte.

Par exemple, pour les planchers, dans ceci conduirait à gérer une valeur de dilatation thermique dans le sens transversal (sens de la petite dimension de l'ouvrage) de l'ordre de 50 cm. Dans le sens longitudinal de l'ouvrage (murs coupe-feu en files 3, 7, 11, 15, 19, 23 et 27), la présence de murs coupe-feu REI 120 minutes est de nature à limiter les dilatations d'ensemble de l'ouvrage en fractionnant la longueur du bâtiment. La longueur maximale de dilatation entre murs coupe-feu est de l'ordre de 86 m. Ceci conduirait par exemple à une valeur de joint de dilatation de l'ordre de 30 cm.

Il est donc nécessaire de prévoir des dispositions constructives permettant de limiter l'impact des dilatations des planchers et des poutres/pannes sur les structures et les murs de compartimentage. Des joints de dilatation spécifiques à la problématique de gestion de la dilatation en cas d'incendie (donc suffisants en nombre et ouverture) pourront être mis en œuvre à cet effet tout comme des structures et assemblages suffisamment ductiles et résistants pour absorber de tels déplacement.

La présence potentielle de zones de mezzanines « ouvertes » en béton, dont le degré de résistance au feu n'a pas été précisé, peut être de nature à remettre en cause les exigences sur la ruine en chaîne verticale. En effet ces éléments étant des éléments structuraux « lourds » (avec charges d'exploitation non négligeables), il convient d'être particulièrement vigilant dans le cas de ruine qui interviendrait antérieurement à la durée de compartimentage potentiellement exigée pour le plancher plus bas. Il conviendra donc d'harmoniser le degré de stabilité au feu des planchers des mezzanines si ce cas se présente.

Compte tenu des dimensions et de la configuration du bâtiment et en complément des dispositions présentées précédemment, les concepts suivants sont proposés afin de tendre à satisfaire aux objectifs de sécurité rappelés au §3 :

Poutres / Pannes / planchers :

- La tenue au feu des éléments de structure horizontaux en béton (poutres, pannes, dalles, ...) devra respecter l'exigence réglementaire sans en être trop éloignée de sorte à limiter la dilatation avant défaillance. Un renforcement du degré de résistance au feu des planchers et poutres de rive ainsi que des poteaux les supportant permet de s'assurer que les premières ruines aient bien lieu au centre du bâtiment.
- Dans le sens de la longueur des cellules, des joints de dilatation réguliers peuvent être mis en place afin de limiter la dilatation longitudinale maximale avant ruine de la première panne ou du premier plancher. On peut également jouer sur les sections des pannes (en I ou rectangulaire) pour panacher des pannes avec durées de résistance au feu « faibles » et dilatations rapides et des pannes avec durées de résistance au feu longues et atteinte du pic de dilatation après ruine des pannes en I.
- Pour le cas des pannes, la mise en place d'élément de résistance au feu plus faible en partie centrale de la cellule est de nature à favoriser une première ruine loin des rives, limitant le risque vis-à-vis de l'effondrement vers l'extérieur ou de propagation aux cellules adjacentes.
- Dans le cas des dalles alvéolées précontraintes, celles-ci présentent en général une dilatation linéique moins importante dans leur sens de leur portée, du fait notamment de la précontrainte.

Poteaux :

- Les poteaux au droit des murs CF devront être stables au feu pour des durées de tenue au feu des murs coupe-feu à minima. Il conviendra de prendre en compte dans leur dimensionnement des effets du second ordre ($P-\Delta$) associés au gradient thermique. Les fondations doivent également être dimensionnées en conséquence.
- Si des murs coupe-feu sont disposés en rive du bâtiment, les poteaux de rive devront être stables au feu pour des durées de tenue au feu des murs CF sans tenir compte du maintien en tête des éléments horizontaux dans la cellule exposée et en considérant les charges de vent et les éventuels effets du second ordre ($P-\Delta$) associés au gradient thermique. Les fondations doivent également être dimensionnées en conséquence.
- Concernant ces poteaux de rive, dans le cas où le gradient thermique entrainerait un déplacement vers l'extérieur (cas des panneaux béton coupe-feu posés en applique extérieur ou en feuillure) et

donc une ruine vers l'intérieur peu probable, il est nécessaire pour satisfaire l'exigence de non ruine vers l'extérieur et de non ruine en chaîne de s'assurer de la tenue des poteaux pendant une durée bien supérieure à l'exigence réglementaire. Cette exigence pourrait être considérée atteinte dans le cas où les poteaux restent stables pendant le double de la durée d'isolation du mur coupe-feu (degré EI).

- Pour les poteaux de rive supportant en tête des poutres ou des ramasses pannes, la mise en place d'un prolongement du poteau par une baïonnette permet également de limiter le risque de chute de ces éléments vers l'extérieur ou de poussée sur les panneaux extérieurs.
- Afin d'éviter une ruine en chaîne entre les blocs structurels, il conviendra d'assurer une stabilité des éléments de part et d'autre d'un mur coupe-feu sans tenir compte du poids des éléments coté cellule en feu.
- Les liaisons en tête de ces poteaux devront être suffisamment résistantes vis-à-vis des efforts générés par les échauffements des éléments notamment en toiture.

Panneaux coupe-feu :

- Dans le cas où des murs de façade de grande hauteur seraient réalisés en panneaux lourds (béton, béton cellulaire...), la pose en applique extérieure des poteaux est à éviter. En effet, ce type de procédé présente intrinsèquement des risques de chute de panneaux lourds vers l'extérieur. De plus la mise en place des panneaux coupe-feu du côté intérieur permet de s'affranchir des problématiques d'effet bilame dû au gradient thermique dans les poteaux évoqués précédemment (voir figure ci-après).

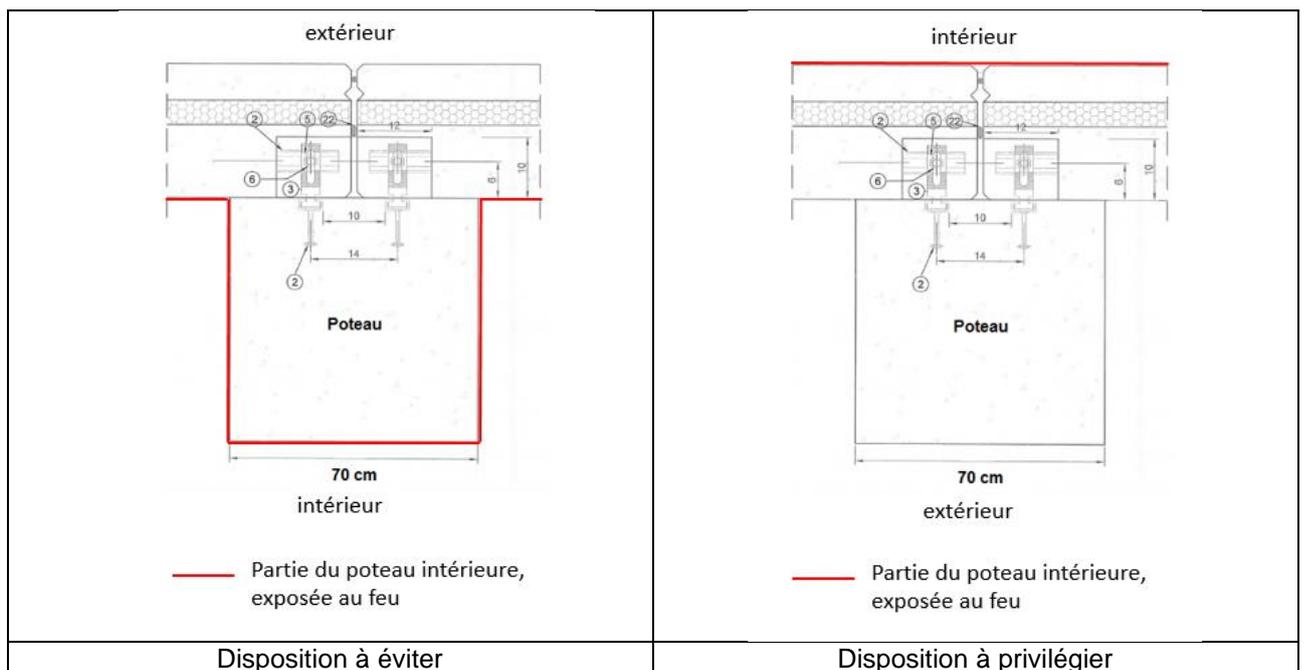


Figure 6-4 : Murs coupe-feu extérieur – Dispositions à privilégier

- Dans tous les cas, et de façon plus prononcée si les poteaux en béton sont soumis à un effet bilame, la tenue mécanique des panneaux coupe-feu ne doit pas être remise en cause en cas de déformation du poteau. En d'autres termes, le dimensionnement des fixations des panneaux devra tenir compte de l'inclinaison potentielle des poteaux pendant le sinistre.

Assemblages :

- Les assemblages devront avoir une durée de résistance au feu supérieure ou égale aux éléments supportés.
- Afin d'éviter la ruine de l'assemblage interne d'une poutre avant celui situé en rive (ex Figure 6-1 c et f), un surdimensionnement des assemblages internes est à prévoir. Une surcapacité de 50% par exemple est de nature à limiter ce risque.
- L'échauffement des poutres entraîne leur dilatation qui sollicite les liaisons en cisaillement. De plus, leur perte de résistance génère également une augmentation de leur flèche et donc de leur rotation sur appui. Les assemblages de ces éléments doivent être en mesure de supporter les efforts

complémentaires de cisaillement ainsi que les premières rotations sur appuis associées à ces flèches sans mobiliser d'effet de levier susceptible de les rompre.

- Dans le cas de présence de planchers intermédiaire, les effets de leur dilatation sur les efforts des éléments de toiture ou de planchers supérieurs sont à considérer. Cela se traduit par des efforts de traction dans ces éléments et leurs liaisons et à des ouvertures des JD. Les liaisons doivent être suffisamment résistantes et ductiles pour absorber ces phénomènes. À titre informatif, les efforts au niveau des assemblages des pannes en toitures peuvent être de l'ordre de plus de 10 à 15 tonnes en situation d'incendie.

Compartimentage des cellules adjacentes :

- Il est nécessaire de s'assurer qu'entre blocs structurels indépendants, les déplacements et déformations d'une zone sinistrée sur le bloc adjacent indépendant n'engendrent pas de désordre. Pour ce faire, un joint de dilatation suffisamment important peut être mis en place. Ces joints de construction peuvent prendre des valeurs importantes, notamment dans le cas d'un poteau isolé soumis à un gradient thermique (plusieurs dizaines de cm) et en fonction de la longueur totale pouvant se dilater. Sinon, un dimensionnement en capacité tenant compte des poussées prévisionnelles pourrait être réalisé.
- Après ruine des éléments horizontaux dans la cellule froide, il convient également de tenir compte des efforts liés aux gradients thermiques des poteaux des murs coupe-feu. En l'absence de calculs thermomécaniques précis, l'effort maximal pouvant se développer au droit d'une liaison entre une cellule sinistrée et une cellule froide par l'action unique du gradient thermique peut être quantifié de manière sécuritaire par calcul du moment résistant en pied du poteau à froid, avec prise en compte des coefficients de sécurité en situation accidentelle d'incendie. À noter qu'avant la ruine des poutres, des efforts parfois supérieurs peuvent intervenir du fait de la dilatation des éléments horizontaux. Il n'est toutefois pas possible de les quantifier sans analyse thermomécanique.

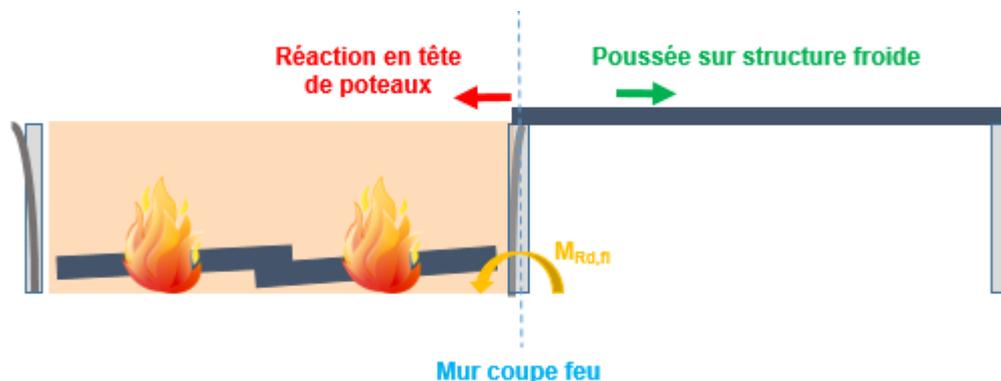


Figure 6-5 : Effort en tête de poteau au droit du mur coupe-feu.

L'effort F de dimensionnement de l'assemblage en tête de poteau coté « froid » pour la seule action du gradient thermique du poteau, peut être calculé de façon sécuritaire d'après la formule suivante :

$$F = \frac{M_{Rd,fi}}{H}$$

Avec :

- F : Effort horizontal dans l'assemblage ;
- H : hauteur du poteau ;
- $M_{Rd,fi}$: Moment résistant en pied du poteau en considérant les matériaux froids et les coefficients de sécurité en situation d'incendie.

6.2. STRUCTURES METALLIQUES DES AMENAGEMENTS INTERIEURS

6.2.1. Mezzanines de quai

Dans les cellules 2, 3, 4 et 5, une mezzanine est prévue au niveau des quais pour recevoir :

- Des bureaux/locaux, dans les cellules 2 et 6 ;
- Des stations de picking shuttle dans les cellules 4 et 5.

Si des bureaux/locaux sociaux sont implantés sur la mezzanine des cellules 2 à 6, comme indiqué dans la Figure 3-2, la mezzanine doit pouvoir assurer une stabilité au feu de 2h et les locaux doivent être isolés par un mur/plancher et plafond au moins REI120, à moins qu'il s'agisse de bureaux dits « de quai », destinés à accueillir le personnel travaillant directement sur les stockages, zones de préparation ou réception.

Concernant la structure porteuse des mezzanines de quais des cellules 4 et 5, elle sera réalisée avec des profilés acier potentiellement directement repris par la structure en béton armé de l'entrepôt pour des raisons de praticité et d'exploitation de la zone (pas de poteaux métalliques intermédiaires).

Cette disposition constructive implique un examen particulier des connexions à la jonction entre la structure de la mezzanine acier et la partie béton de l'entrepôt. Le client a évoqué la prise en compte de boulons fusibles pour la réalisation de ces connexions dont l'action en cas de feu réel reste à justifier (voir examen et recommandations du §6.2.6).

6.2.2. Mezzanines de grandes surfaces (mais inférieures à 50%)

D'après les plans, l'emprise prévue pour les mezzanines situées dans les cellules 6 et 7 est légèrement inférieure à 50 % de la surface en cellule au RDC. Selon la réglementation en vigueur, et le guide d'application de la réglementation 1510 [10], il est nécessaire de réaliser une étude spécifique visant à évaluer les risques particuliers, notamment pour les personnes, et à vérifier que les mezzanines ne gênent pas le désenfumage en cas d'incendie et à déterminer les mesures spécifiques à mettre en place pour toute mezzanine ayant plusieurs étages. Ces études pourraient ainsi permettre d'éviter un dimensionnement R120 de l'ensemble des étages de la mezzanine (planchers R+1 et R+2).

Quoiqu'il en soit, une étude thermomécanique avancée devra être réalisée au niveau de ces mezzanines pour s'assurer que leur comportement au feu est compatible avec les exigences suivantes :

- Compatibilité du temps de ruine avec l'évacuation des personnes ;
- Compatibilité du temps de ruine avec les conditions de tenabilité des personnes et des services de secours ;
- Compatibilité du mode de ruine avec :
 - une ruine ne se faisant pas vers l'extérieur (sur les cheminements d'évacuation ou sur les services de secours en intervention) ;
 - la non ruine en chaîne (intracellulaire et extracellulaire) des structures adjacentes ;
 - le maintien de la stabilité au feu des murs de compartimentage pendant l'intégralité de leur degré coupe-feu.

Pour ce type de structure, la ruine en chaîne verticale est difficile à exclure et reste fonction de son dimensionnement (dimensionnement R120 ou non, structures acier ou non).

6.2.3. Racks automatisés

Les racks automatisés de mini load, shuttle, buffer, etc. sont des structures dépendantes multi-étagées utilisées pour le stockage des palettes, colis ou de bacs. Ces structures métalliques sont réalisées dans leur sens transversal en plusieurs tours en structure treillis reliées entre elles en tête. Les profilés utilisés sont dans la majeure partie des cas des profilés formés à froid de très faible épaisseur rendant leur comportement au feu assez sensible. Des travailleurs de maintenance auront accès aux zones entre les racks des racks automatisés. A noter que ce type de structures automatisées sont a priori présentes dans les cellules 2 à 5.

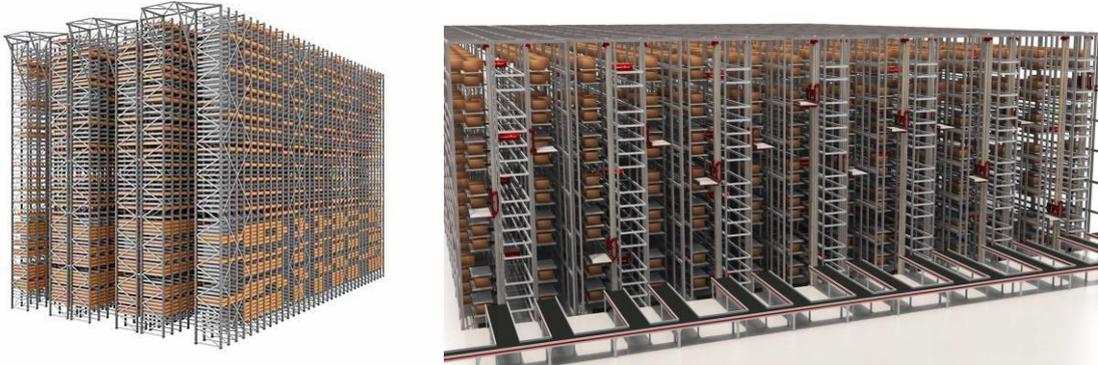


Figure 6-6 : Vue d'un mini-load à gauche et un shuttle à droite

Une étude thermomécanique avancée devra être réalisée au niveau de ces racks pour s'assurer que leur comportement au feu est compatible avec les exigences suivantes (identiques à celles présentées au paragraphe précédent) :

- Compatibilité du temps de ruine avec l'évacuation des personnes ;
- Compatibilité du temps de ruine avec les conditions de tenabilité des personnes et des services de secours ;
- Compatibilité du mode de ruine avec :
 - une ruine ne se faisant pas vers l'extérieur (sur les cheminements d'évacuation ou sur les services de secours en intervention) ;
 - la non ruine en chaîne (intracellulaire et extracellulaire) des structures adjacentes ;
 - le maintien de la stabilité au feu des murs de compartimentage pendant l'intégralité de leur degré coupe-feu.

6.2.4. Racks traditionnels

Un stockage par des racks traditionnels est prévu avec une hauteur de stockage maximale de 13,70 m dans la zone E de la cellule 4.

Ces zones n'ont pas besoin de faire l'objet d'une étude thermomécanique avancée pour s'assurer que leur comportement au feu est compatible avec les exigences présentées au paragraphe précédent.

6.2.5. Rappel des phénomènes

Toutes ces structures sont réalisées en acier, parfois à l'aide de profilés minces de faibles épaisseurs et formés à froid. La tenue au feu de ces structures est très faible (entre 5 et 10 minutes en général). Il conviendra de s'assurer que les dispositions mises en œuvre pour ces structures permettent de respecter les objectifs de sécurité de l'arrêté du 24 septembre 2020, notamment en termes de mode de ruine et de durée de stabilité afin de permettre l'évacuation des personnels dans des conditions sécurisées à savoir :

- Compatibilité du temps de ruine avec l'évacuation des personnes ;
- Compatibilité du temps de ruine avec les conditions de tenabilité des personnes et des services de secours ;
- Compatibilité du mode de ruine avec :
 - une ruine ne se faisant pas vers l'extérieur (sur les cheminements d'évacuation ou sur les services de secours en intervention) ;
 - la non ruine en chaîne (intracellulaire et extracellulaire) des structures adjacentes ;
 - le maintien de la stabilité au feu des murs de compartimentage pendant l'intégralité de leur degré coupe-feu.

La tenue au feu des éléments en acier non protégés est principalement assurée par la massiveté des profilés et leurs taux de travail. La capacité portante des éléments décroît lorsque les profilés s'échauffent et peut être remise en cause au-delà de 500°C, voire de 350°C pour les éléments les plus fins (sections de classe 4). Concomitamment à ces pertes de capacité portante, l'échauffement des éléments entraîne des variations dimensionnelles importantes des sections générant des dilatations et courbures des éléments.

Ainsi, lorsqu'une structure en acier est soumise à l'incendie, son comportement mécanique peut être schématisé en plusieurs phases distinctes :

- Phase de dilatation :
 - Au début de l'incendie, l'échauffement de la structure demeure relativement faible pour ne pas affaiblir de manière significative les caractéristiques mécaniques des éléments. Dans cette première phase, l'augmentation de la température des éléments se traduit principalement par un déplacement vers l'extérieur de la structure exposée au feu et par une augmentation des efforts de poussée sur les parties restées froides. Ce phénomène se poursuit jusqu'à l'apparition des premières ruines d'éléments structuraux (plastification ou instabilité de section). Dans le cas des éléments en acier, cette phase peut être assez courte (quelques minutes).
- Phase de ruine :
 - Lorsque l'échauffement des éléments de structure dans les zones les plus exposées est tel que l'on observe les premières ruines, les efforts transmis à la partie de structure non échauffée sont répercutés aux éléments encore stables par les contreventements de la structure. Ce surplus de charge peut amener d'autres éléments à ruiner également, potentiellement avant qu'ils n'aient atteint une température susceptible de les affaiblir substantiellement (ruine en chaîne), ou peut déséquilibrer la structure de sorte à ce qu'elle s'effondre.

6.2.6. Recommandations pour satisfaire les objectifs de résistance au feu des structures intérieures

Mezzanines de quais et jonction potentielle avec la charpente béton :

Pour les mezzanines de quais, la connexion des éléments porteurs acier aux structures béton de l'entrepôt implique un examen particulier des connexions.

Il conviendra donc dans un premier temps de s'assurer que les porteurs béton verticaux et/ou horizontaux sur lesquels sont connectés les structures acier, peuvent reprendre les efforts de ruine de celles-ci. Dans un premier temps, il est possible de procéder par un dimensionnement en capacité. Les efforts de ruine transmis à la structure béton étant nécessairement limités à la valeur de la résistance à froid (en combinaison incendie) des assemblages à la jonction acier/béton.

Le client a évoqué la prise en compte de boulons fusibles pour la réalisation de ces connexions. Cette utilisation semble être une bonne idée en cas d'un feu pleinement développé (feu conventionnel ISO 834 par exemple) puisqu'une fois échauffés, ils permettent un détachement de la structure acier du support béton. Cependant, dans les cas de feu dit « réel » la ruine de ce type de structure acier peut intervenir dans des temps assez courts, avant même que l'ensemble de la zone soit complètement échauffée. Aussi, au loin du départ de feu, les connexions sont encore froides et non fusibles ce qui impliquerait un risque de ruine en chaîne au moment de la ruine de la structure de la mezzanine au loin du foyer.

Le dimensionnement en capacité via la résistance à froid des assemblages reste la solution à privilégier pour cette zone.

En cas de mezzanines sur plusieurs niveaux, il est difficile d'exclure la ruine en chaîne verticale prématurée des niveaux situés sous la mezzanine de quais. Des dispositions en termes d'évacuation, détection, temporisation, temps de ruine, devront être prises en compte en fonction des structures porteuses en jeu (évacuations horizontales donnant directement sur l'extérieur par exemple, ...).

Mezzanines de grande surface et racks de grande hauteur :

Les structures des mezzanines de grandes surfaces peuvent être construites intégralement en profilés aciers sur un principe poteau-poutre-solives. Les structures des racks automatisés de grande hauteur sont construites sur le même principe avec présence de structures treillis en grande redondance. Compte tenu des dimensions des structures métalliques concernées, ces éléments sont susceptibles, dans la phase de dilatation, de générer des déplacements importants en rive.

Les préconisations ci-après s'appliquent aux racks automatisés uniquement et aux mezzanines de grandes dimensions, dans la mesure où les autres racks sont classiques en termes de hauteur et d'usage et donc couramment utilisés dans les entrepôts de stockage en France sans exigence complémentaire.

Ainsi, afin d'éviter que les structures viennent à toucher les éléments de compartimentage lors de leur phase de dilatation, il est recommandé de laisser un espace libre de 50 cm à 100 cm minimum entre la structure métallique et les murs de compartimentage de la cellule l'accueillant.

Il est également nécessaire d'éviter tout risque d'effondrement de ces structures pendant la période nécessaire à l'évacuation des personnes. Ainsi les structures devront disposer d'une durée de stabilité au feu minimale permettant d'assurer cet objectif. Cela conduit en général à prévoir un surdimensionnement des structures à froid.

Les effets de ruine en chaîne peuvent être contrôlés en répartissant suffisamment de zones de contreventement dans la structure afin d'obtenir une ruine plus progressive. Un minimum de trois zones de contreventements (CVT) verticaux est recommandé dans chaque direction du plan de la structure (longitudinal et transversal). Ces contreventements doivent être régulièrement répétés et complétés par un contreventement horizontal à chaque niveau capable d'agir en tant que diaphragme. Ces contreventements peuvent prendre la forme de croix verticales ou de zones renforcées pour assurer une rigidité d'ensemble supérieure.

Afin de contrôler les risques de ruine de vers l'extérieur, il est intéressant de s'assurer que les zones centrales de la structure s'effondrent en priorité sur les zones périphériques. Ainsi la redistribution des efforts aura tendance à ramener les éléments périphériques vers l'intérieur. Pour cela, la mise en place d'une liaison entre racks placée en tête de ces derniers (ou mise en place d'une ferme) suffisamment dimensionnée pour reprendre les efforts horizontaux générés par la ruine d'un rack est recommandée. Un surdimensionnement (en massivités et en caractéristiques mécaniques) des structures métalliques périphériques est recommandé pour éviter un phénomène de ruine vers l'extérieur. Aussi, la prise en compte d'imperfections géométriques et d'efforts horizontaux dans le dimensionnement des structures à froid est de nature à créer des réserves de rigidité horizontale bien venues dans le cadre de ces études de mode de ruine.

Enfin, afin de limiter le risque de ruine en chaîne de la structure béton lors de l'effondrement de la structure métallique ou l'endommagement des murs séparatifs entre cellules ainsi que les éventuels murs coupe-feu en façade, il convient de vérifier la tenue des poteaux de la structure principale sous les efforts liés aux interactions entre les structures. Pour ce faire, de manière enveloppe, on peut considérer que les efforts maximaux pouvant se développer à chaque niveau sont limités par la résistance minimale (« maillon le plus faible ») des éléments pouvant impacter les poteaux (poutre, solives, assemblages...). La figure suivante schématise ces phénomènes. Des choix peuvent donc être faits sur le dimensionnement des poteaux de la structure principale comme sur les résistances des éléments (assemblages notamment) pour vérifier cet objectif.

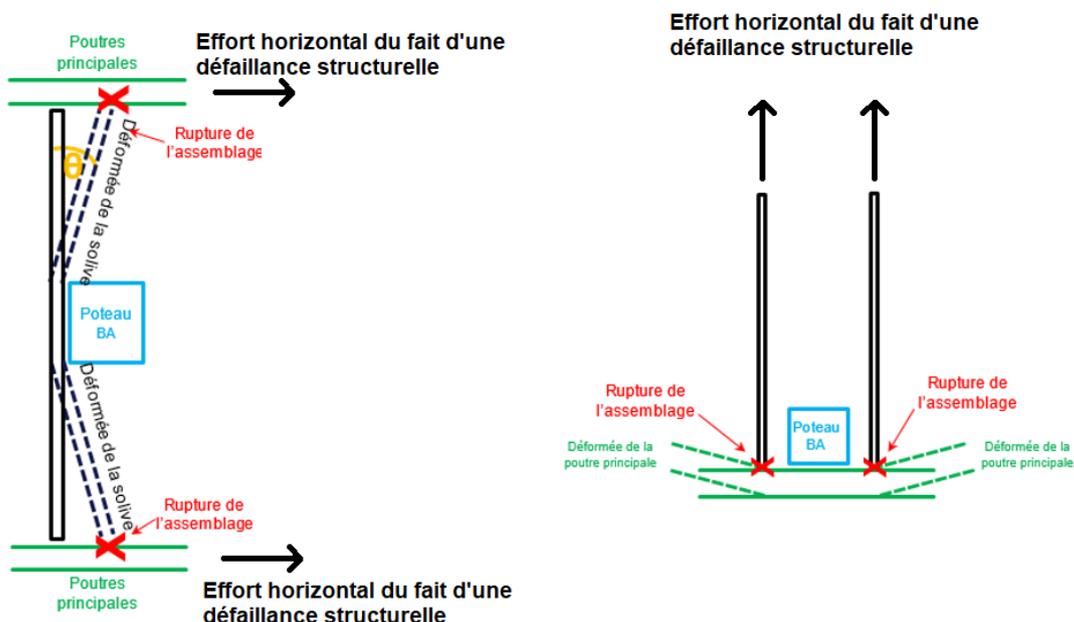


Figure 6-7 : Interactions structures métalliques et structure principale de la cellule

7. CONCLUSION

Cette note préliminaire étudie de manière qualitative les structures du projet d'implantation d'un entrepôt à Montargis (45). Compte-tenu du caractère préliminaire de l'état d'avancement du projet, elle donne quelques principes de conception permettant de respecter les exigences de comportement des structures dans le cadre des exigences formulées dans l'arrêté du 11 avril 2017 modifié.

L'application des dispositions décrites dans cette note doit permettre de satisfaire les objectifs de sécurité rappelés au §3, à savoir :

- Le non effondrement vers l'extérieur de la structure du bâtiment.
- Le non effondrement en chaîne prématuré de la structure.
- Le maintien de l'intégrité du mur CF séparatif pendant sa durée de compartimentage.
- La compatibilité des temps de ruine des structures avec l'évacuation des personnes.

Cette note ne peut servir de justification des structures vis-à-vis de l'incendie et doit être complétée d'une étude technique pouvant prendre la forme d'une étude spécifique d'ingénierie de sécurité incendie et par calcul thermomécanique des éléments structuraux selon les méthodes avancées des Eurocodes.

Cette étude permettra de s'assurer que pour les objectifs précités, les caractéristiques du bâtiment et le mode de stockage conduisent à atteindre l'ensemble des objectifs identifiés en ce qui concerne la stabilité au feu et le mode de ruine. Sur la base du dimensionnement définitif du bâtiment, et éventuellement d'études ou de calculs intermédiaires, ces objectifs et critères seront vérifiés

En l'état de connaissance du projet, les justifications, prenant en compte les phénomènes décrits dans le présent document, devront porter sur les structures principales en béton des huit cellules, devront également porter sur les mezzanines métalliques de grandes surfaces (mais de surface inférieure à 50% de la surface totale de la cellule) présentes dans les cellules 6 et 7 et les mezzanines de quais présents dans les cellules 2 à 7, suivant les demandes des autorités ou de VALIMMO. À ces justifications viendraient s'ajouter les justifications sur le comportement des zones de stockage automatisées de grande hauteur dans les cellules 2 à 5.



Efectis France
Espace Technologique
Bâtiment Apollo
Route de l'Orme des Merisiers
F-91193 Saint-Aubin
Tél : 33 (0)1 60 13 83 80

NOTE DE PRINCIPES DESENFUMAGE ET EVACUATION

Référence : 23-000856b-AMat
Affaire : 23-000974-SA

ETUDES D'INGENIERIE DANS LE CADRE DU DEVELOPPEMENT D'UNE BASE LOGISTIQUE A MONTARGIS (45)

NOTE DE GRANDS PRINCIPES RELATIVE AU DESENFUMAGE ET A L'EVACUATION

Client demandeur VALIMMO

Référence et date de commande Bon de commande du 07/03/2023

Projet Base logistique à Montargis (45)

Date : 14 avril 2023
Indice de révision : B
Nombre de pages : 12

Auteur(s) :
Amandine WILHELM

SUIVI DES MODIFICATIONS

Indice de révision	Date	Modifications
A	30/03/2023	Version initiale
B	14/04/2023	Mise à jour des surfaces de mezzanines en cellules 6 et 7

SOMMAIRE

1. Introduction.....	4
2. Documents de référence	4
2.1. Documents fournis par le client	4
2.2. Textes réglementaires et normatifs	4
3. Présentation du projet.....	5
3.1. Généralités	5
3.2. Exploitation	6
4. Revue des exigences réglementaires	8
4.1. Désenfumage	8
4.2. Evacuation	9
5. Spécificités du projet.....	11
5.1. Mezzanine au niveau des quais	11
5.2. Mezzanine dans les cellules 6 et 7.....	12
5.3. Cellules accueillant des racks sur la longueur de la cellule	12
5.4. Personnel de maintenance.....	12
6. Conclusion	12

1. INTRODUCTION

Efectis travaille depuis plusieurs années en partenariat avec les bureaux d'études, constructeurs et donneurs d'ordre pour développer des bases logistiques partout en France.

La société VALIMMO a sollicité Efectis pour réaliser un accompagnement pour le développement d'une base logistique classée sous le régime de l'Autorisation des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement au titre de la rubrique 1510. Le bâtiment situé à Montargis (45) sera composé de 8 cellules en simple RDC dont 6 comporteront une mezzanine de plusieurs étages (notés R+1 et R+2).

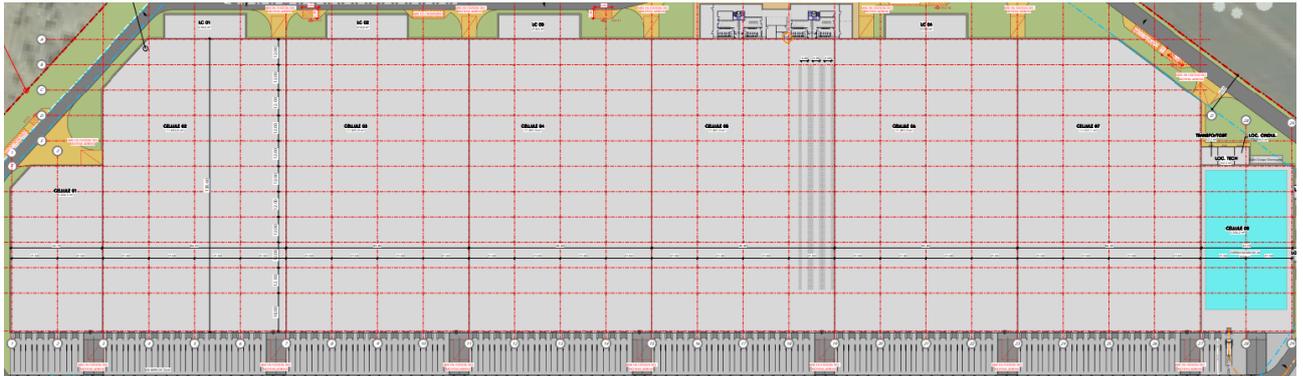


Figure 1-1 : Plan masse du projet

L'accompagnement proposé par Efectis intègre les missions suivantes :

- Grands principes des études de désenfumage ;
- Grands principes des études d'évacuation du personnel ;
- Grands principes des études de mode de ruine des structures ;

Le présent document concerne le premier et le second volets (désenfumage et évacuation). Il fait la synthèse des grands principes à retenir en phase conception pour maximiser les chances d'obtenir des résultats en cohérence avec la réglementation et répondant aux exigences fonctionnelles du bâtiment.

2. DOCUMENTS DE REFERENCE

2.1. DOCUMENTS FOURNIS PAR LE CLIENT

- [1] 20230223_Cultura_Plan masse intralog.pptx
- [2] 20230303_M2M_Descriptifs zones.xlsx
- [3] 20220930_presentation intralog – Extract.pdf

2.2. TEXTES REGLEMENTAIRES ET NORMATIFS

- [4] Arrêté du 24 septembre 2020 modifiant l'arrêté ministériel du 11 avril 2017 relatif aux prescriptions générales applicables aux entrepôts couverts soumis à la rubrique 1510, y compris lorsqu'ils relèvent également de l'une ou plusieurs des rubriques 1530, 1532, 2662 ou 2663 de la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement, ainsi que les arrêtés de prescriptions générales applicables aux installations classées soumises à enregistrement sous les rubriques n° 1511, 1530, 1532, 2662 et 2663. NOR: TREP2009123A ;
- [5] Arrêté du 11 avril 2017 relatif aux prescriptions générales applicables aux entrepôts couverts soumis à la rubrique 1510
- [6] Décret n°2008-244 du 7 mars 2008 et annexe associée
- [7] Entrepôts de matières combustibles- Guide d'application de la rubrique 1510 et de l'arrêté ministériel du 11 avril 2017 modifié relatif aux prescriptions générales applicables aux entrepôts couverts soumis à la rubrique 1510 – version de février 2023

3. PRESENTATION DU PROJET

3.1. GENERALITES

Le projet de construction consiste en la création d'un entrepôt de dimensions 585 m x 139 m (L x l) avec :

- Au RDC, des cellules de stockage inférieures à 12 000 m², séparées par des parois REI120 ou 240 (à définir) ;
- Une hauteur au faîtage de 15,5 m pour une hauteur de stockage maximale de 13,70 m ;
- Des mezzanines en R+1 et R+2 au niveau des quais des cellules 2 à 7 sur la longueur du bâtiment et d'une plus grande emprise en cellules 6 et 7 (inférieure à 50% de la surface au sol du RDC).

A noter que le bâtiment comporte le niveau du RDC uniquement. La notion de R+1 et R+2 dans ce rapport désigne uniquement les étages de mezzanines, non pas des niveaux au sens réglementaire des ICPE.

A noter également que la cellule 1 sera dédiée au stockage d'aérosol et de liquides inflammables et sera classée en 4331 et 4321 au régime de l'enregistrement.

Les figures ci-après présentent des vues en plan des étages des mezzanines, représentées en orange.

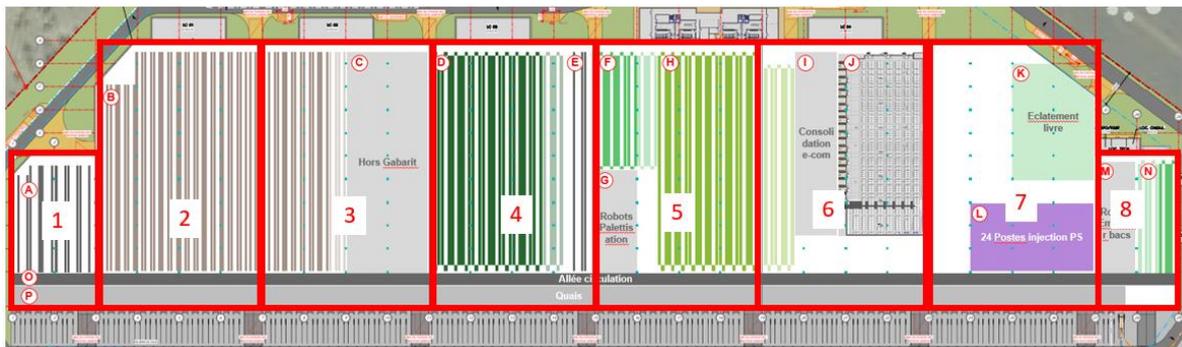


Figure 3-1 : Plan du niveau RDC

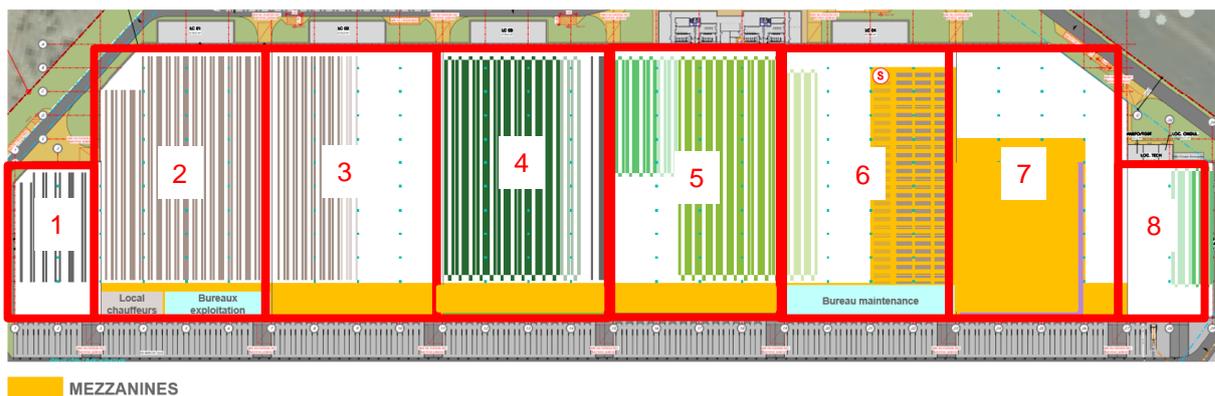


Figure 3-2 : Plan de l'étage R+1 de la mezzanine

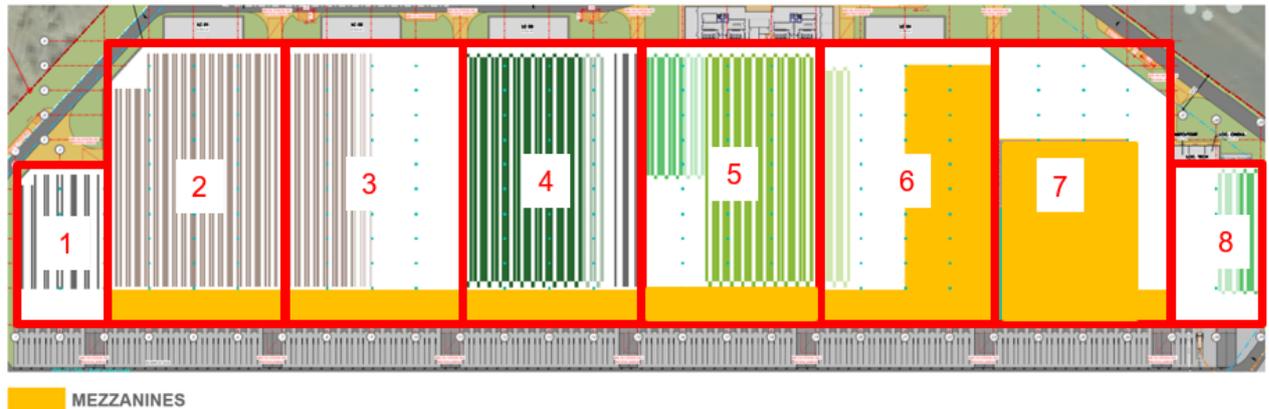


Figure 3-3 : Plan de l'étage R+2 de la mezzanine

3.2. EXPLOITATION

Différentes zones d'exploitation sont définies au sein des cellules. Elles sont détaillées ci-dessous et représentées sur les plans en figure. :

Au niveau RDC, on trouve :

- Zone A : Racks de stockage de produits dangereux (aérosols, LI) avec allées larges de 3,6 m ;
- Zone B : Racks de stockage en allées étroites de 1,8 m de large. Des chariots tridimensionnels (avec ou sans conducteur) circulent dans les allées ;
- Zone C : Zone de stockage au sol pour les produits volumineux ;
- Zone D : Zone mécanisée : stockage colis complets en triple profondeur ;
- Zone E : Rack de stockage pour consommables (cartons, sacs de caisse etc.) ;
- Zone F : Zone mécanisée : Zone tampon (buffer) des colis d'expédition (entrée le matin pour sortie le soir) ;
- Zone G : Zone de palettisation avec des bras mécanisés ;
- Zone H : Zone mécanisée : picking détail en bacs ;
- Zone I : Zone de consolidation des commandes e-commerce provenant des différentes zones (shuttle, Scallog etc.) grâce à un système de rucher d'éclatement manuel avec dépose put-to-light ;
- Zone J : Zone mécanisée : étagères mobiles (Scallog) ;
- Zone K : Zone mécanisée d'éclatement du livre pour les gros volumes
Les livres sont injectés unitairement et automatiquement triés par magasin dans un bac ;
- Zone L : Zone mécanisée : 24 postes d'injection (pocket sorter) ;
- Zone M : Robots permettant d'empiler les bacs en sortie du buffer de bac pour les poser sur une base roulante avant expédition en magasin ;
- Zone N : Zone mécanisée : Zone tampon (buffer) des bacs de livres issus du Pocket Sorter ;
- Zone O : Allée de circulation en face des quais ;
- Zone P : Surface de quais.

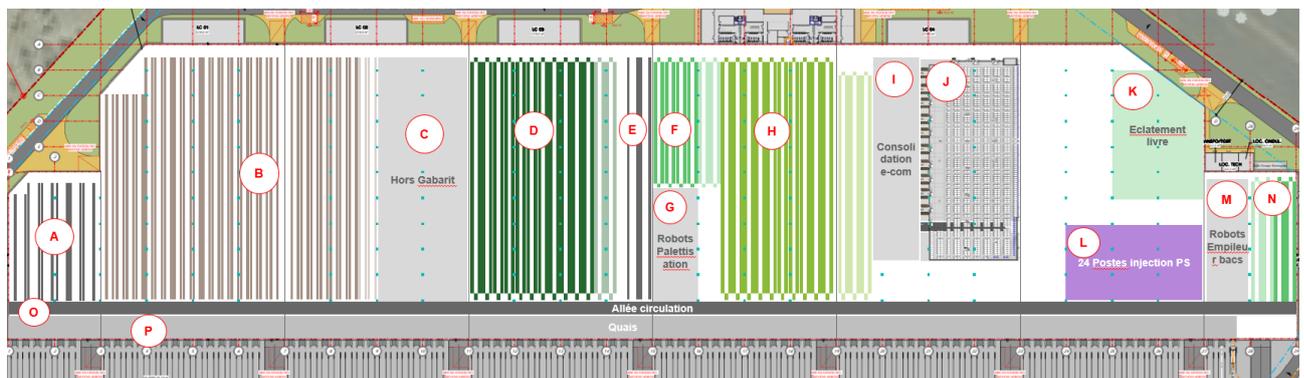


Figure 3-4 : Identification des zones d'exploitation au RDC

Au R+1 des mezzanines :

- Zone Q : Zone mécanisée : 10 stations pour miniload ;
- Zone R : Zone mécanisée : 10 stations pour shuttle ;
- Zone S : Rack de stockage ;
- Zone T : Zone mécanisée : 40 stations de mise en bac.

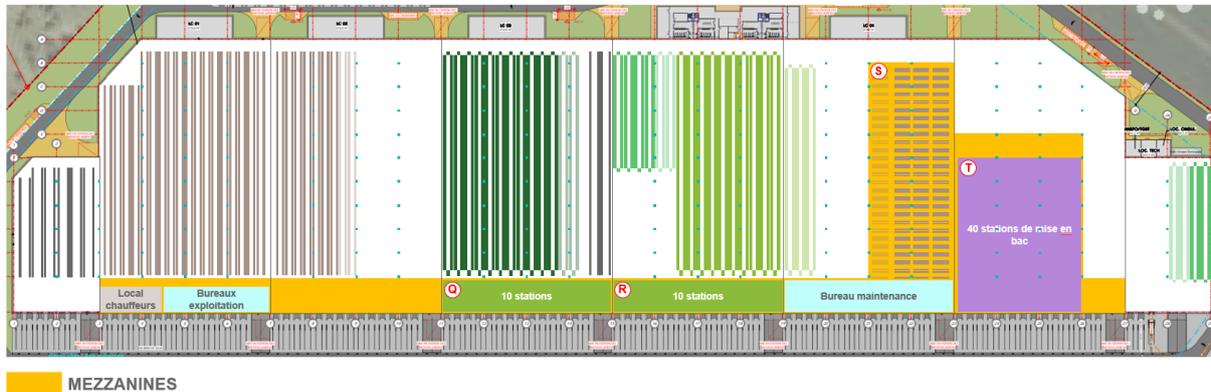


Figure 3-5 : Identification des zones d'exploitation au R+1 des mezzanines

Au R+2 des mezzanines :

- Zone U : Zone mécanisée : 10 stations pour shuttle ;
- Zone V : Zone mécanisée pour le tri des livres, constituée d'une partie dynamic buffer et d'une partie matrix sorters.

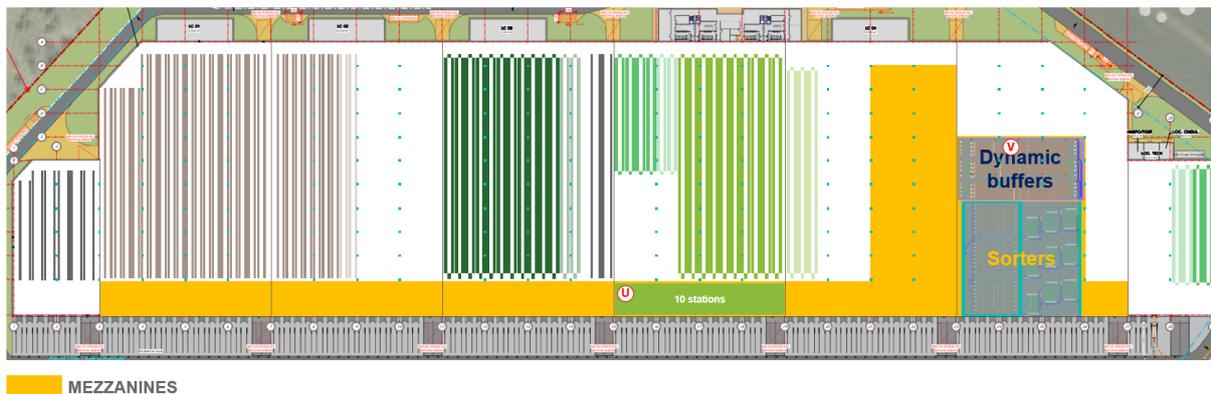


Figure 3-6 : Identification des zones d'exploitation au R+2 des mezzanines

4. REVUE DES EXIGENCES REGLEMENTAIRES

S'agissant d'une ICPE sous la rubrique 1510, la réglementation applicable au bâtiment est l'arrêté du 11 avril 2017 [5] modifié par l'arrêté du 24 septembre 2020 [4]. Ce paragraphe a pour objet de lister les exigences applicables au projet relativement au désenfumage et à l'évacuation.

4.1. DESENFUMAGE

Le §5 de l'arrêté [4] décrit les exigences à respecter :

« Les cellules de stockage sont divisées en cantons de désenfumage d'une superficie maximale de 1 650 mètres carrés et d'une longueur maximale de 60 mètres. Chaque écran de cantonnement est stable au feu de degré un quart d'heure, et a une hauteur minimale de 1 mètre (Arrêté du 24 septembre 2020) », sans préjudice des dispositions applicables par ailleurs au titre des articles R. 4216-13 et suivants du Code du travail ». La distance entre le point bas de l'écran et le point le plus près du stockage est supérieure ou égale à 0,5 mètre. Elle peut toutefois être réduite pour les zones de stockages automatisés.

Les cantons de désenfumage sont équipés en partie haute de dispositifs d'évacuation des fumées, gaz de combustion, chaleur et produits imbrûlés.

Des exutoires à commande automatique et manuelle font partie des dispositifs d'évacuation des fumées. La surface utile de l'ensemble de ces exutoires n'est pas inférieure à 2 % de la superficie de chaque canton de désenfumage.

Le déclenchement du désenfumage n'est pas asservi à la même détection que celle à laquelle est asservi le système d'extinction automatique. Les dispositifs d'ouverture automatique des exutoires sont réglés de telle façon que l'ouverture des organes de désenfumage ne puisse se produire avant le déclenchement de l'extinction automatique.

Il faut prévoir au moins quatre exutoires pour 1 000 mètres carrés de superficie de toiture. La surface utile d'un exutoire n'est pas inférieure à 0,5 mètre carré ni supérieure à 6 mètres carrés. Les dispositifs d'évacuation ne sont pas implantés sur la toiture à moins de 7 mètres des murs coupe-feu séparant les cellules de stockage. Cette distance peut être réduite pour les cellules dont une des dimensions est inférieure à 15 m.

La commande manuelle des exutoires est au minimum installée en deux points opposés de l'entrepôt de sorte que l'actionnement d'une commande empêche la manœuvre inverse par la ou les autres commandes. Ces commandes manuelles sont facilement accessibles aux services d'incendie et de secours depuis les issues du bâtiment ou de chacune des cellules de stockage. Elles doivent être manœuvrables en toutes circonstances.

Des amenées d'air frais d'une superficie au moins égale à la surface utile des exutoires du plus grand canton, cellule par cellule, sont réalisées soit par des ouvrants en façade, soit par des bouches raccordées à des conduits, soit par les portes des cellules à désenfumer donnant sur l'extérieur.

En cas d'entrepôt à plusieurs niveaux, les niveaux autres que celui sous toiture sont désenfumés par des ouvrants en façade asservis à la détection conformément à la réglementation applicable aux établissements recevant du public. »

Synthétiquement, il est possible de résumer les exigences dans le tableau suivant :

	Exigences
Canton	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Superficie < 1 650 m² ▪ Longueur < 60 m
Ecran de cantonnement	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hauteur minimale : 1 m, 25% de la hauteur dans la limite de 2 m suivant référence à l'IT246 ▪ Distance entre écran et stockage : ≥ 0,5 m, peut être réduite en cas de stockage automatisé
Exutoires	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Au minimum 2 % de la superficie du canton ▪ 4 exutoires pour 1 000 m² de toiture ▪ Surface utile comprise entre 0,5 et 6 m² ▪ Implantation à plus de 7 m des murs coupe-feu séparant les cellules de stockage
Amenées d'air frais	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Surface ≥ surface utile des exutoires du plus grand canton ▪ Réalisée par ouvrants de façade ou par des bouches raccordées à des conduits ou par les portes donnant sur l'extérieur
Déclenchement désenfumage	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Automatique par thermofusible après activation du système d'extinction automatique ▪ Manuel au minimum en deux points opposés de l'entrepôt facilement accessible aux services d'incendie et de secours depuis les issues du bâtiment ou de chacune des cellules de stockage.

Tableau 4-1 : Synthèse des exigences liées au désenfumage

4.2. EVACUATION

Le §14 de l'arrêté [4] décrit les exigences à respecter :

« Conformément aux dispositions du code du travail, les parties de l'entrepôt dans lesquelles il peut y avoir présence de personnel comportent des dégagements permettant une évacuation rapide.

En outre, le nombre minimal de ces dégagements permet que tout point de l'entrepôt ne soit pas distant de plus de 75 mètres effectifs (parcours d'une personne dans les allées) d'un espace protégé, et 25 mètres dans les parties de l'entrepôt formant cul-de-sac.

Deux issues au moins, vers l'extérieur de l'entrepôt ou sur un espace protégé, dans deux directions opposées, sont prévues dans chaque cellule de stockage d'une surface supérieure à 1000 m². En présence de personnel, ces issues ne sont pas verrouillées et sont facilement manœuvrables.

Dans le trimestre qui suit le début de l'exploitation de tout entrepôt, l'exploitant organise un exercice d'évacuation. Il est renouvelé au moins tous les six mois sans préjudice des autres réglementations applicables. »

Les distances de 75 mètres s'appliquent pour les cellules en simple rez-de-chaussée et pour leurs mezzanines.

Ces dispositions seraient à compléter pour des cellules (et pour leurs mezzanines) qui se trouveraient en R+1 ou R+2, pour lesquelles le Code du Travail [6] s'appliquerait. Notamment, l'article R4216-11 indique que :

« La distance maximale à parcourir pour gagner un escalier en étage ou en sous-sol n'est jamais supérieure à quarante mètres.

Le débouché au niveau du rez-de-chaussée d'un escalier s'effectue à moins de vingt mètres d'une sortie sur l'extérieur.

Les itinéraires de dégagements ne comportent pas de cul-de-sac supérieur à dix mètres. »

Les exigences relatives à l'évacuation peuvent donc se résumer ainsi :

	Exigences pour des cellules au RDC	Exigences pour des cellules au R+1 ou plus
Distance de parcours maximale	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 75 m ▪ 25 m en cul-de-sac 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 40 m ▪ 10 m en cul-de-sac
Débouché d'un escalier	<ul style="list-style-type: none"> ▪ < 20 m d'une issue 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ < 20 m d'une issue
Disposition issues	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Deux issues dans deux directions opposées pour cellule > 1000 m² 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Deux issues dans deux directions opposées pour cellule > 1000 m²

Tableau 4-2 : Synthèse des exigences liées à l'évacuation

5. SPECIFICITES DU PROJET

De manière générale, il convient donc d'appliquer les exigences listées dans les Tableau 4-1 et Tableau 4-2 en ce qui concerne le désenfumage et l'évacuation. Toutefois, le projet présente certaines spécificités qu'il convient de prendre en compte. Ce paragraphe détaille les points d'attention à retenir dans le cadre du projet.

5.1. MEZZANINE AU NIVEAU DES QUAIS

Dans les cellules 2, 3, 4 et 5, une mezzanine est prévue au niveau des quais pour recevoir :

- Des bureaux/locaux, dans les cellules 2 et 6 ;
- Des stations de picking shuttle dans les cellules 4 et 5.

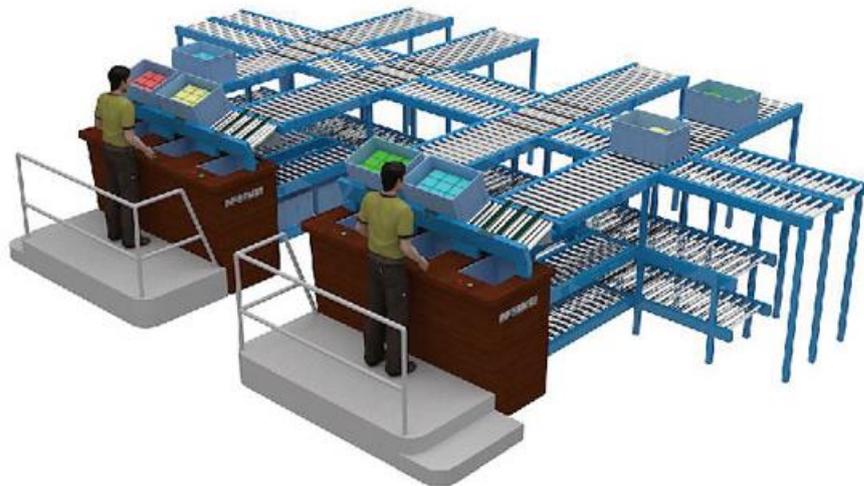


Figure 5-1 : Illustration des stations picking shuttle

Idéalement, il conviendrait de prévoir une évacuation horizontale pour le personnel situé sur ces mezzanines, avec des issues donnant directement sur l'extérieur.

Par ailleurs, pour les cellules comportant une mezzanine, un système de détection dédié et adapté doit être prévu (§12 de l'annexe II [4]). Concrètement, il s'agit de prévoir un système de détection sous chaque étage de mezzanine ainsi que sous toiture sur l'ensemble de la surface de la cellule.

Note : si des bureaux/locaux sociaux sont implantés sur la mezzanine, comme indiqué dans la Figure 3-2, ils doivent être isolés par un mur/plancher et plafond au moins REI120 et respecter une distance de parcours de 40 m pour l'évacuation, à moins qu'il s'agisse de bureaux dits « de quai », destinés à accueillir le personnel travaillant directement sur les stockages, zones de préparation ou réception. Dans ce cas, il faudra uniquement prévoir un report d'alarme (afin qu'elle puisse être audible depuis ces bureaux).

5.2. MEZZANINE DANS LES CELLULES 6 ET 7

D'après les plans, l'emprise prévue pour les mezzanines situées dans les cellules 6 et 7 est légèrement inférieure à 50 % de la surface en cellule au RDC.

- Mezzanine cellule 6 : environ 5 800 m², ce qui représente 48% de la surface du RDC de la cellule ;
- Mezzanine cellule 7 : environ 5 500 m², ce qui représente 48% de la surface du RDC de la cellule

Par ailleurs, la mezzanine disposant d'un plancher plein, il est nécessaire de mettre en place un désenfumage spécifique de celle-ci pour évacuer l'accumulation potentielle de fumées tout en limitant leur propagation au reste du bâtiment. Pour cela, il convient de prévoir la mise en place de trémies/caillebotis dans le plancher de la mezzanine, représentant une superficie de l'ordre de 5 % géométrique de sa surface, pour permettre l'évacuation des fumées en cas de départ de feu sous la mezzanine. Ceci pourra être vérifié par le biais d'une étude d'ingénierie de désenfumage.

5.3. CELLULES ACCUEILLANT DES RACKS SUR LA LONGUEUR DE LA CELLULE

Les zones B, D, E, H et J reçoivent des racks sur toute la longueur de la cellule. Si du personnel se trouve au niveau des allées, il devra alors longer les racks pour atteindre une façade et enfin une issue de secours. Les cellules ayant une longueur de l'ordre de 139 m, il faudra donc parcourir au minimum 70 m pour atteindre une façade. La distance maximale de parcours autorisée étant de 75 m, il conviendra de placer judicieusement les issues pour réduire au maximum la distance à parcourir, et ce sur les deux façades. Dans l'extrême, la surface de 75 m pourrait être dépassée. Dans ce cas, il conviendra également de réaliser des études spécifiques afin de s'assurer que ces distances ne remettent pas en question la sécurité du personnel au cours de son processus d'évacuation.

5.4. PERSONNEL DE MAINTENANCE

Il existe beaucoup de zones mécanisées au sein du bâtiment, qui doivent toutefois être entretenues par du personnel de maintenance. Ces zones sont les zones D, F, H, J, K, L et N. Outre l'attention à porter au positionnement des issues en façade décrite au § 5.3, ce personnel aura une phase d'évacuation verticale pour atteindre le sol, qui s'additionnera au temps d'évacuation horizontal.

Ainsi, pour assurer leur évacuation dans des délais raisonnables, il conviendra de mettre en place un système de détection adapté permettant une mise en alerte rapide et d'équiper le personnel de maintenance d'un système d'alarme portatif de sorte à être alertés le plus rapidement possible. De même des procédures spécifiques devront être développées pour cette catégorie de personnel afin de s'assurer d'une évacuation rapide et efficace en cas d'alerte incendie.

6. CONCLUSION

La société VALIMMO a sollicité Efectis pour réaliser un accompagnement relatif au désenfumage et à l'évacuation dans le cadre du développement d'une base logistique classée sous le régime des ICPE au titre de la rubrique 1510.

Dans ce contexte, Efectis a rappelé les exigences à respecter relativement à l'arrêté applicable au bâtiment (Arrêté du 24 septembre 2020 [4] et Code du Travail [6] dans les zones applicables) et les a synthétisées dans les Tableau 4-1 et Tableau 4-2.

Par ailleurs, des recommandations ont été faites concernant les spécificités du projet de sorte à rendre l'évacuation plus sûre pour le personnel de maintenance notamment.

Enfin, la présence de mezzanines dans les cellules 6 et 7 impliquent un dimensionnement spécifique de caillebotis au sein de celle-ci pour permettre un désenfumage efficace des étages. Un système de détection incendie spécifique devra également être installé pour ces cellules.