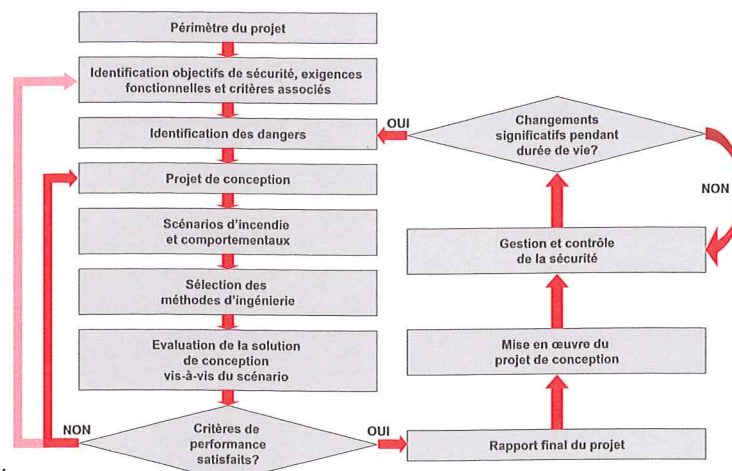
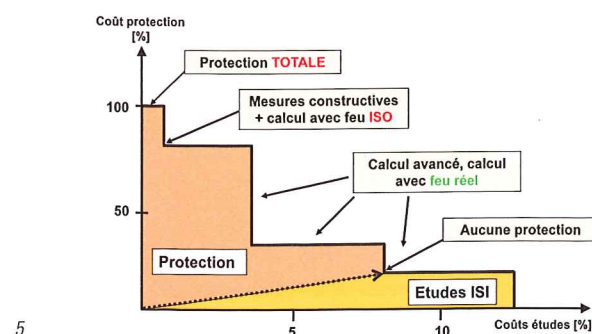


Fig. 4 : Processus d'ingénierie de la sécurité incendie (conception, mise en œuvre et maintenance), tiré de l'ISO 23932 [6]

Fig. 3 : Evolution des coûts de protection en fonction du coût des études d'ingénierie incendie (sur la base d'études réalisées)



Ingénierie de la Sécurité Incendie (ISI)



Protection standard

Le concept standard consiste à respecter des exigences de durée de résistance de la structure porteuse pendant un certain temps, normalement situé entre 30 et 90 minutes au maximum. Ces exigences sont précisées dans les tableaux 5.1 (fig. 2) ou 5.2 (fig. 3), selon que la protection inclut ou non un réseau sprinkler.

Pour la structure, le concept standard est mis en œuvre par diverses mesures simples :

- mesures constructives : choix des matériaux, dimensionnement, typologies de structures, cloisonnements, etc.,
- mesures techniques : installations sprinklers (réduction des exigences selon le tableau 5.2).

Dans les mesures constructives, on peut citer par exemple :

- protéger les éléments de structure (peintures intumescentes, mortiers projetés ou plaques isolantes),
- utiliser des éléments de structures qui résistent bien au feu (béton armé ou construction mixte),

- appliquer les normes (SIA, Eurocodes) et prouver avec des méthodes analytiques simples la résistance d'éléments de structures isolés.

Protection par ouvrage

Le concept par ouvrage, tout en se basant sur le concept standard puisqu'on doit respecter les mêmes exigences, permet d'approfondir l'analyse. Il s'appuie sur des méthodes d'ingénierie avancées – simulations par éléments finis – pour analyser des systèmes complexes combinant plusieurs éléments porteurs, voire un bâtiment en entier. Ce concept permet aussi d'ajouter des mesures organisationnelles (formation, organisation de la sécurité en entreprise, etc.) aux mesures constructives et techniques. On peut ainsi intégrer l'ensemble des mesures et adapter en conséquence le coefficient de sécurité utilisé pour le dimensionnement en cas d'incendie. Cela reste néanmoins assez complexe et demande de l'expérience. A cet égard, l'ECA Vaud a fait un gros effort en publiant la « Recommandation ECA relative aux méthodes d'ingénierie pour les calculs de résistance au feu de systèmes porteurs » [6], un document qui permet de guider l'ingénieur civil qui souhaite utiliser des méthodes de calcul avancées.

Pour appliquer les mesures avancées résultant d'un concept par ouvrage, il faut avoir une approche globale qui inclut tous les aspects de la protection incendie. Pour cela, on doit s'appuyer sur une méthodologie bien définie, comme par exemple celle de la norme ISO 23932 [6] (fig. 4). Un tel concept nécessite de définir, avec tous les intervenants (architecte, ingénieurs civils et CVSE, maître d'ouvrage, autorité ECA ou Police du feu, voire les utilisateurs/locataires), l'ensemble des aspects et paramètres permettant de traduire, en termes d'exigences et d'objectifs de protection, la sécurité incendie. Pour que le concept soit efficace, il faut s'assurer de son respect durant l'exécution des travaux, mais aussi, ce qui est souvent plus délicat, de son application pendant l'exploitation du bâtiment.

Gains économiques

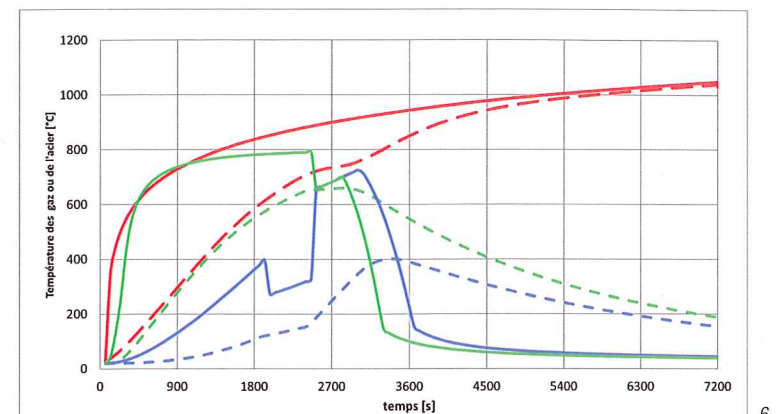
La protection des structures selon le concept « standard » est aisée : quelques calculs ou des valeurs (dimensions minimales des éléments ou de recouvrement d'armatures, etc.) trouvées dans des tables (normes SIA et Eurocodes, publi-

⁴ Un feu naturel est calculé à partir de scénarios alors que la courbe ISO est figée.

⁵ Modèle analytique qui permet de calculer tous les paramètres d'un incendie dans une enceinte fermée

Fig. 6 : Maison de la Paix – Scénarios de feux naturels. Courbe ISO en rouge (échauffement de la section en traitillé) : après 60 minutes, la température de l'acier dépasse 800 °C. Avec les feux naturels (vert et bleu), la température de l'acier n'atteint que 650 °C.

Fig. 7 : Maison de la Paix – Coupe transversale



Elle a d'abord conduit à l'utilisation d'actions thermiques plus favorables par la définition de plusieurs scénarios de feux naturels⁴ (fig. 6) et par la détermination des températures des gaz, obtenues par calcul informatique dans un modèle de zones⁵.

Ces températures sont utilisées pour calculer l'échauffement de la structure en différents endroits : des températures des gaz (fumées chaudes principalement) moins élevées permettent à une structure de résister plus longtemps sans protection : l'acier conserve 100 % de sa résistance jusqu'à 400 °C, il perd 50 % de sa résistance à 550 °C et 90 % à 800 °C. On peut visualiser cela en considérant, sur la figure 6, la surface sous les courbes qui traduit l'énergie thermique dégagée pour chaque scénario : la surface sous la courbe ISO (traitillé rouge) est généralement plus importante que celles sous les courbes calculées des feux naturels.

Ensuite, le maître d'ouvrage a été consulté concernant les déformations potentielles ou résiduelles qu'il acceptait en cas d'incendie. En acceptant des déformations non-réversibles (tout à fait normales en cas d'incendie avec une structure non protégée, lorsque l'on veut sauver prioritairement des vies), ce dernier aura été impliqué dans le processus décisionnel. Si ces déformations sont tolérables dans un immeuble de bureaux, elles pourraient se révéler très pénalisantes, voire source de faillite,

cations spécialisées) suffisent généralement. Elle se justifie pour des structures simples, avec des éléments isolés et peu nombreux. Cette démarche reconnue peut être appliquée dans la plupart des ouvrages par un ingénieur généraliste.

Pour les structures complexes, une optimisation se justifie économiquement. La figure 5 illustre la relation entre les coûts des études et ceux de la protection : lorsque le projet devient important, les frais d'études complémentaires sont rapidement compensés par les économies de réalisation et d'exploitation qu'elles engendrent. Toutefois, pour que le concept par ouvrage aboutisse à des solutions intéressantes, il convient de disposer d'une grande expérience dans le calcul des structures et d'un solide bagage théorique en sécurité incendie, ce qui rend nécessaire le recours à un spécialiste, ainsi que l'illustrent les deux exemples qui suivent.

Application à des bureaux open-space entièrement vitrés

Bâtiment de grandes dimensions, le projet de la Maison de la Paix à Genève a été délicat à traiter du point de vue de la protection incendie, en raison de certains éléments liés à sa conception architecturale (fig. 7) :

- grandes surfaces open-space entièrement vitrées en façade intérieure et extérieure,
- éléments porteurs verticaux élancés en acier non protégés,
- structures tubulaires tridimensionnelles supportant plusieurs étages, dont les déformations pourraient poser problème.

Après discussions entre l'architecte (dont la volonté était de garder toutes les structure apparentes) et le maître d'ouvrage (pour qui chaque économie d'investissement et de maintenance était bienvenue), l'ingénieur civil s'est adjoint les services d'un collègue spécialiste en sécurité incendie pour analyser le projet. Le bâtiment a dès lors été traité selon un concept par ouvrage. Cette démarche, autorisée par la Police du feu du Canton de Genève conformément aux PPI, s'est révélée très bénéfique, en dépit du fait que la conception structurale du projet était déjà bien avancée.

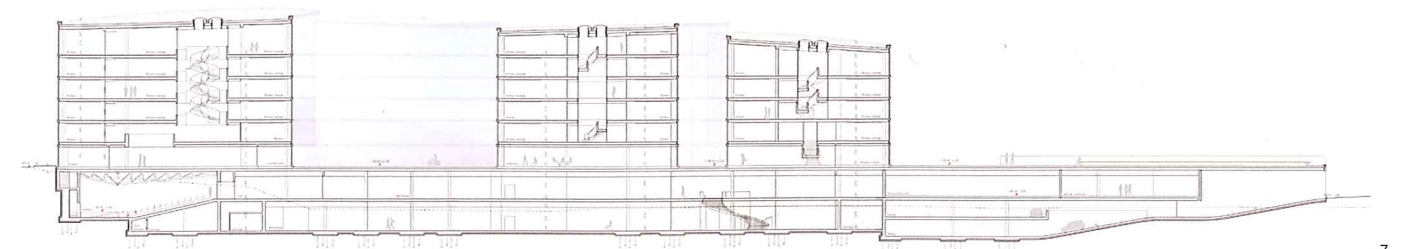
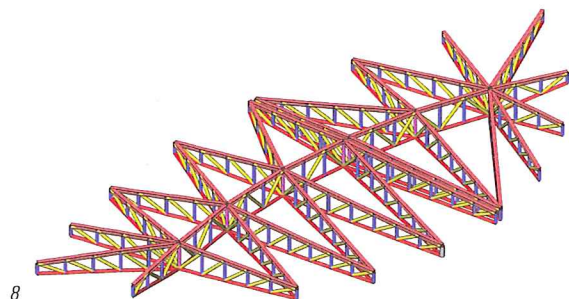


Fig. 8: Maison de la paix – Contrôle de la déformation du porte-à-faux en cas d'incendie limité à un étage

Fig. 9: Ateliers existants de l'usine Bobst: les poutres mixtes et les colonnes tubulaires ne sont pas protégées contre l'incendie. L'étude d'ingénierie incendie a permis d'évaluer leur résistance effective.



dans le cas d'une usine dont la production ne pourrait pas être interrompue.

Au niveau du calcul, on a pu respecter l'uniformité architecturale en optimisant la résistance des colonnes métalliques (mixtes ou non) et des structures tridimensionnelles qui supportent certaines façades en porte-à-faux, tout en assurant à moindre coût la sécurité R60 exigée. Cela a été possible en utilisant des modèles de calcul particuliers, notamment en considérant des scénarios de feux localisés (feux de durée limitée circonscrits autour d'une colonne). Finalement, ces scénarios ont été vérifiés à l'aide de la dynamique des fluides (modèles complexes de calculs en 3D) pour valider et illustrer les calculs analytiques réalisés précédemment.

Parmi les mesures techniques actives dont les effets peuvent se cumuler pour réduire l'impact d'un incendie (détection incendie et prise en compte du bon réseau d'adduction de l'eau en ville), l'installation d'un 2^e réseau de sprinkler – en plus de celui de base nécessaire pour lutter contre le feu – a été prise en compte pour refroidir la structure tridimensionnelle au dessus de l'auditoire (à gauche sur fig. 7 et fig. 8).

Finalement, dans la phase d'exécution, la bonne mise en œuvre du concept d'ingénierie incendie devra être vérifiée par l'entreprise générale, qui devra coordonner les différents intervenants, notamment les mandataires des installations techniques. En phase d'exploitation, la sécurité globale des bâtiments (incendie, effraction, gestion énergétique, etc.) sera assumée par un chargé de sécurité.

Dans ce cas précis, le concept par ouvrage permet une économie de l'ordre d'un million et demi sur la protection incendie passive. Il diminuera de plus les frais de maintenance et d'exploitation, tout en assurant un niveau de sécurité optimal.

Etudes incendie de bureaux dans une fabrique de machines

Deux études d'ingénierie incendie ont accompagné le projet d'agrandissement du site de l'entreprise Bobst SA à Mex, près de Lausanne: une pour des nouveaux locaux (industrie

et administration) et une autre pour des locaux existants de même affectation.

La première concernait la conception d'une nouvelle structure métallique sur quatre niveaux qui soit la plus flexible possible. L'exigence de résistance R60 (selon le tableau 5.2) a été atteinte par la mise en place d'un concept par ouvrage utilisant tous les outils à disposition de l'ingénieur spécialiste:

- mesures constructives: construction mixte acier-béton dimensionnée en optimisant la section des colonnes (encombrement minimal) et des poutres principales ajourées (passages des CVSE) par éléments finis et preuve par le calcul de la non-ruine de ces éléments pendant toute la durée de l'incendie (bien au-delà des 60 minutes requises, donc aussi en phase de refroidissement, ce qui est régulièrement le cas lors d'un calcul avec « feu naturel »),
- mesures techniques: réseaux de sprinkler avec détection incendie et transmission automatique à la centrale d'alarme de l'entreprise et des SI,
- mesures organisationnelles: équipes de pompiers d'entreprise et responsables de sécurité en interne, avec formation du personnel, réévaluation du concept de sécurité de tout le site.

Ces mesures techniques et organisationnelles ont été prises en compte dans les hypothèses, et permettent une analyse avec des températures de calcul plus basses. Au final, ces dernières diminuent l'impact de l'incendie sur le dimensionnement de la structure. Le contrôle de l'efficacité et du fonctionnement de ces mesures est du ressort de l'entreprise (responsabilité), des mandataires (maintenance) et des utilisateurs (consignes internes de sécurité). L'ECA, les polices du feu et les communes se doivent de veiller à la bonne application de ces mesures.

Les économies réalisées, obtenues tout en maintenant l'exigence R60, sont de l'ordre de 400 000 francs, soit 2 % du prix total, ceci sans compter les économies sur les frais de maintenance des matériaux de protection.



La deuxième étude, réalisée par soucis d'uniformisation de la sécurité dans l'entreprise, devait évaluer la sécurité incendie des planchers de la partie existante. Construite à l'époque des anciennes directives AEAI, la zone concernée, entièrement sprinklée, était alors considérée conforme aux normes. Selon les PPI AEAI de 2003 [3] et [4], le sprinkler ne serait plus suffisant comme seule mesure de protection de ces locaux. Ceux-ci peuvent cependant rester dans l'état si aucune transformation lourde (modification des surfaces ou de l'affectation) n'est entreprise. Ici, le maître d'ouvrage envisage de rendre les anciens locaux conformes aux nouvelles prescriptions, si cela influence positivement l'exploitation. Il s'agit donc là d'une démarche volontaire.

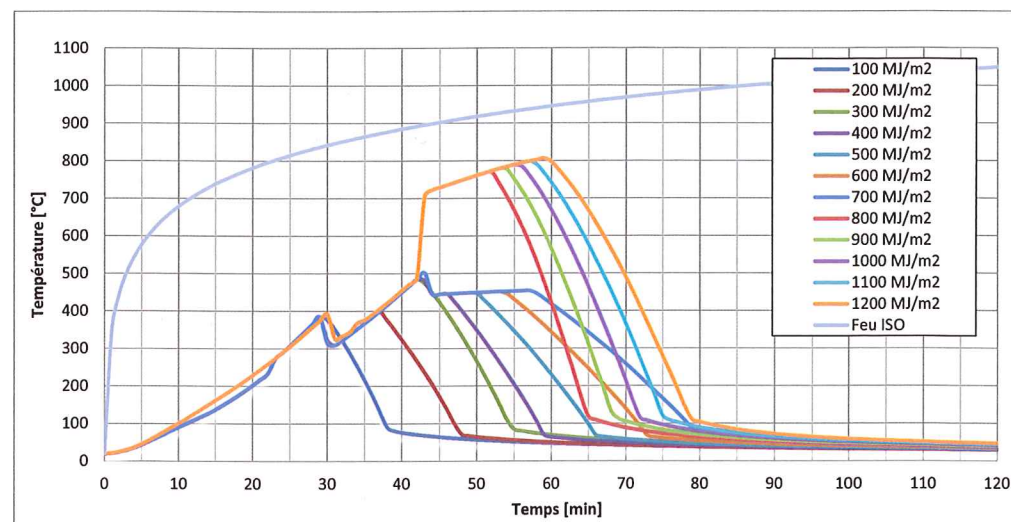
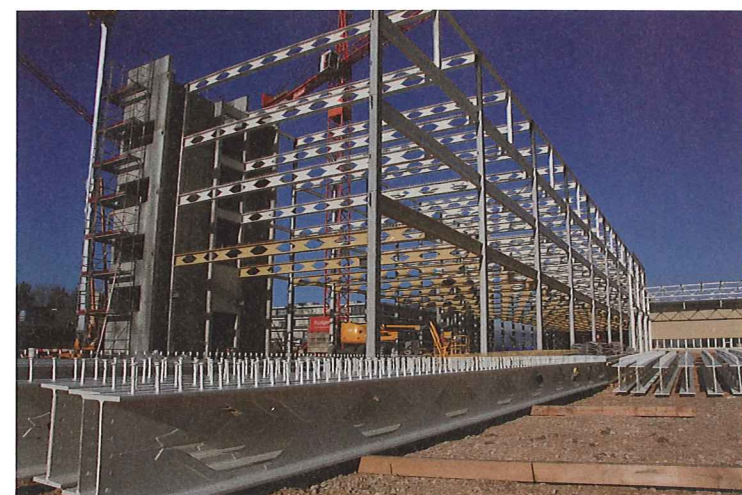
Une réévaluation de risque à l'aide d'un concept par ouvrage a été effectuée en analysant notamment l'impact de la variation de la charge thermique dans les locaux: selon les résultats, on saura si l'exigence R30 selon tableau 5.2 est atteinte ou non. La figure 10 résume une des approches pour le rez-de-chaussée. Les courbes correspondent à des simulations de « feux naturels » et sont obtenues à partir de calculs analytiques sur des compartiments bien définis géométriquement, en intégrant le contenu des locaux et les conditions de ventilation (portes, fenêtres, etc.). Ces courbes sont ensuite utilisées pour échauffer les structures et calculer leur comportement en cas d'incendie, de façon souvent moins conservatrice qu'avec le concept standard et la courbe ISO (courbe noire), donc plus économique.

Ces simulations ont permis une étude paramétrique de la charge thermique qui a confirmé que la situation actuelle, avec l'affectation de type « montage d'armoires électriques » (industrie légère), est acceptable sans mesures complémen-

Fig. 10: Ateliers existants de l'usine Bobst: Etude paramétrique de la température maximale des gaz du compartiment, en faisant varier la charge thermique (MJ/m²). Les courbes sont toutes sous la courbe ISO, donc favorables

Fig. 11: Structure en cours de montage à l'usine Bobst: les poutres des étages 2 et 3 seront laissées sans protection, celles sur rez seront protégées avec une peinture intumescente. Les colonnes sont réalisées en construction mixte acier-béton.

(Sauf mention, tous les documents illustrant cet article ont été fournis par MP Ingénieurs)



taires, jusqu'à concurrence de 250 MJ/m² (ou l'équivalent de 14 kg de bois par m² de surface au sol⁵). Par contre, la charge thermique peut être augmentée à 500 MJ/m² (30 kg équivalent bois/m²) si une détection incendie est mise en place (avec raccordement à la centrale d'alarme de l'ECA): en raccourcissant le délai d'intervention des pompiers, on admet que le risque d'un embrasement généralisé diminue. La charge thermique peut même être portée à 600 MJ/m² (ou 30 kg bois/m²) si les équipes internes de lutte contre le feu peuvent intervenir, ce qui est le cas chez Bobst qui dispose d'équipes de pompiers d'entreprise.

Le concept par ouvrage montre ainsi que diverses solutions sont possibles pour augmenter la flexibilité d'utilisation de locaux. Il permet en outre de quantifier les résultats, ce que

⁵ 1 kg de bois dégage 17 MJ d'énergie en se consumant