

L'INGÉNIERIE DE SÉCURITÉ INCENDIE : UN OUTIL AU SERVICE DE LA PRÉVENTION

Cet article a pour but de présenter les principes de l'ingénierie de sécurité incendie à travers des cas d'application à des lieux de travail. Dans un premier temps, un rappel est fait sur les méthodes et le déroulement d'une étude d'ingénierie ainsi que sur l'apport de la méthode dans le cadre de l'évaluation du risque, notamment professionnel. La seconde partie de l'article présente deux cas concrets permettant d'illustrer l'ingénierie pour des lieux de travail complexes (des établissements de soin et atypiques (un plateau de cinéma avec effets spéciaux pyrotechniques)).

NICOLAS
TREVISAN
CNPP

En France, la réglementation en matière de sécurité incendie repose principalement sur une approche prescriptive. Cela signifie qu'il existe un ensemble de règles et de normes qui définissent de façon détaillée les mesures de sécurité à mettre en œuvre selon le type d'établissement. Ces prescriptions couvrent des domaines comme le compartimentage, l'évacuation, le désenfumage, ou encore la résistance au feu des structures.

Lorsqu'un bâtiment est conçu et exploité en conformité avec ces règles, on considère qu'il satisfait automatiquement aux objectifs de sécurité associés (par exemple, permettre l'évacuation des personnes, faciliter l'intervention des secours ou encore limiter la propagation du sinistre). Il n'est donc pas nécessaire d'apporter une démonstration supplémentaire de performance : le respect strict de la réglementation fait présomption d'un niveau de sécurité suffisant.

L'approche « performantielle » constitue une alternative (ou un complément) à l'approche prescriptive. Cette approche consiste à démontrer que les objectifs de sécurité sont atteints, non pas parce que les prescriptions sont respectées, mais parce que la performance réelle du système (ou de l'organisation) a été évaluée et jugée suffisante. Cette démonstration peut se faire de différentes manières : par des calculs analytiques simples, par des essais ou encore par des simulations numériques.

L'ingénierie de sécurité incendie (notée ISI) constitue l'application de l'approche performantielle au domaine de la sécurité incendie. Bien que l'on puisse parler d'ingénierie de sécurité incendie de façon générale, incluant tout moyen pour démontrer la performance, en pratique on fait souvent référence à des méthodes de simulation numérique. En France,

le recours à l'ISI est encadré réglementairement et seuls certains domaines l'autorisent, les plus courants étant la résistance au feu et le désenfumage. Le recours à l'ISI s'avère pertinent lorsque les particularités d'un bâtiment ne s'inscrivent pas pleinement dans le cadre réglementaire prescriptif, ou lorsque l'application stricte des règles se heurte à des contraintes architecturales, techniques, patrimoniales ou économiques, comme par exemple dans le cas de certains bâtiments industriels, de bâtiments patrimoniaux classés ou de configurations architecturales innovantes ou atypiques. Une ISI peut également être réalisée pour apporter un avis technique lorsque la performance réelle d'une solution suscite un doute, ou encore dans le cadre d'une démarche volontaire visant à analyser, optimiser ou démontrer plus finement le niveau de sécurité incendie d'un établissement.

Quel que soit le domaine concerné, le processus d'une ISI est sensiblement similaire et est présenté dans la norme NF ISO 23932-1 [1]. De manière simplifiée, l'approche est divisée en trois étapes principales :

- dans un premier temps, il est nécessaire de définir le cadre et les limites de l'analyse. Cela consiste, entre autres, à bien identifier les objectifs de sécurité visés et les exigences fonctionnelles associées ainsi qu'à identifier les critères de performances à évaluer ;
- la deuxième partie consiste à définir les scénarios de dimensionnement qui seront utilisés pour évaluer la performance du système. Cette définition passe par une analyse de risques adaptée aux objectifs identifiés précédemment ;
- enfin, la dernière partie consiste à réaliser l'analyse afin de déterminer si les critères de performance sont remplis ou non.

Application de l'ISI au désenfumage

Dans le cas d'une ISI de désenfumage, l'objectif principal consiste généralement à évaluer si le système de désenfumage mis en place dans un établissement est en mesure de maintenir des conditions de « tenabilité » suffisantes pour permettre, en cas de départ de feu, l'évacuation du public et du personnel, mais également pour faciliter l'intervention des services de secours et pour limiter la propagation du sinistre. Pour cela, différents scénarios sont définis. Ils intègrent non seulement les caractéristiques du foyer et de sa propagation éventuelle, mais aussi l'ensemble des éléments liés à la mise en sécurité de l'établissement. Il s'agit notamment de déterminer :

- le moment où le désenfumage est mis en œuvre ;
- le délai de fermeture des portes coupe-feu ;
- comment est réalisée la détection et à quel moment est diffusée l'alarme d'évacuation ;
- la manière dont l'évacuation des occupants est réalisée (cheminement, temps de réaction, organisation du personnel, etc.).

Ces paramètres permettent de construire des scénarios représentatifs et pénalisants à partir desquels la performance réelle du système de désenfumage pourra être évaluée. L'un des principaux avantages de l'ISI est la possibilité de prendre en compte toutes les particularités d'un établissement alors que la réglementation prescriptive reste générique. L'analyse de risque permet de construire ces scénarios, notamment en identifiant les emplacements des charges calorifiques et les sources d'inflammation possibles. L'objectif est d'identifier des scénarios « enveloppes », volontairement majorants. En testant le système dans les conditions les plus sévères, on garantit que les situations moins critiques seront également couvertes. Même si la probabilité d'occurrence de ces scénarios majorants est faible, ils permettent d'éprouver le système dans ses limites. Il convient cependant de ne retenir que des scénarios raisonnablement envisageables

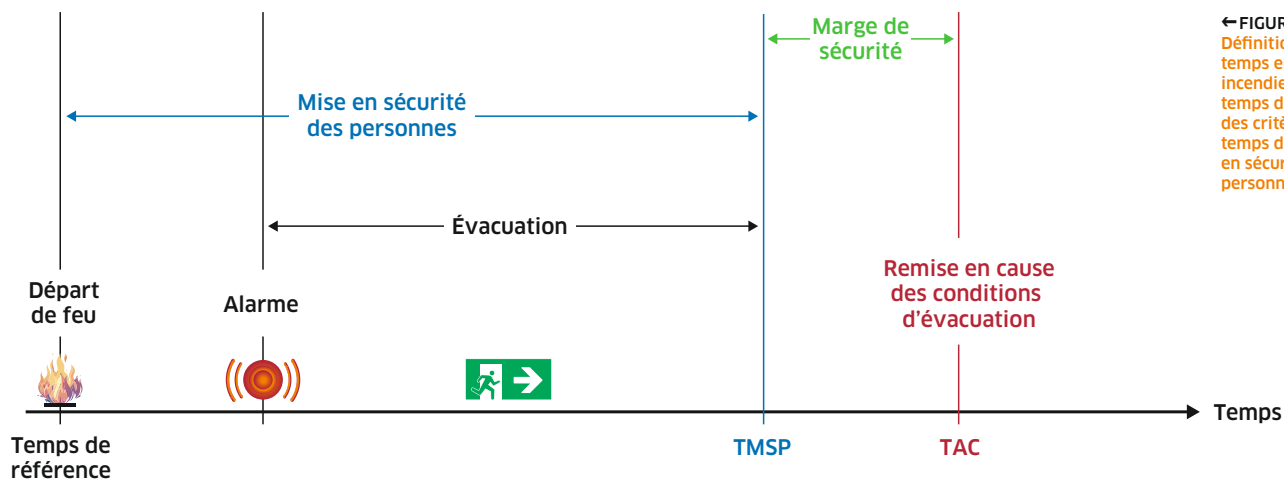
afin d'éviter un surdimensionnement des mesures, voire une impossibilité de définir une solution de mise en sécurité cohérente.

Cette étape de construction des scénarios est réalisée en concertation avec l'ensemble des acteurs du projet. Cette démarche collaborative permet de garantir que le fonctionnement et les spécificités de l'établissement sont bien pris en compte et que les attentes des différentes parties prenantes sont bien intégrées dès les prémices de la démarche. Dans le cadre des études réalisées en établissement recevant du public (ERP), cette étape doit obligatoirement faire l'objet d'une validation par les autorités compétentes afin de s'assurer de la pertinence et de la représentativité des scénarios proposés.

Une fois les scénarios définis et validés, ils sont simulés à l'aide d'un logiciel de mécanique des fluides adapté à la représentation des phénomènes physiques impliqués dans un incendie. Le plus utilisé en France, comme à l'international, est le *Fire Dynamics Simulator* (FDS) [2]. Ce logiciel permet de représenter en 3D le volume concerné et d'y suivre le développement du feu, la propagation des fumées et autres effluents ainsi que les contraintes thermiques qui en résultent.

La méthode d'évaluation de la performance la plus couramment employée consiste à comparer le temps de dégradation des conditions d'évacuation au temps nécessaire à la mise en sécurité des personnes.

La première partie de cette méthode consiste à évaluer à partir de quel instant les conditions deviennent trop dégradées dans les différents locaux pour permettre une évacuation dans de bonnes conditions. Cette évaluation repose sur l'analyse de l'évolution de plusieurs grandeurs clés : la visibilité, la température et le flux thermique radiatif. Des valeurs seuils sont définies pour chacune de ces grandeurs¹. Leur dépassement correspond au temps d'atteinte des critères (noté TAC ; Cf. Figure 1).



← FIGURE 1
Définition des temps en sécurité incendie : temps d'atteinte des critères (TAC), temps de mise en sécurité des personnes (TMS).



La seconde partie consiste à évaluer le temps de mise en sécurité des personnes (noté TMSP). Celui-ci peut être déterminé par des méthodes analytiques ou par des simulations à l'aide de logiciels spécialisés. Il correspond au temps nécessaire pour que l'ensemble de l'effectif présent dans un établissement puisse être mis à l'abri des conséquences d'un incendie. En pratique, il s'agit le plus souvent d'évaluer le temps nécessaire pour évacuer les locaux concernés. En plus du temps nécessaire au cheminement pour atteindre les différentes issues, ce temps inclut également le délai de détection ainsi que le temps de réaction des personnes. Il s'agit d'une valeur théorique du temps minimal nécessaire à l'évacuation de l'établissement, basée sur une succession d'hypothèses pénalisantes. Ce calcul ne prend pas en compte les comportements humains qui pourraient ralentir cette évacuation. Une solution sera jugée performante si le TAC est supérieur au TMSP. Plus cet écart est important, plus la marge de sécurité est élevée et permet, par exemple, de couvrir des aléas liés aux comportements humains.

Exemple d'utilisation de l'ISI de désenfumage dans un établissement de santé

Le premier exemple de recours à l'ISI concerne le désenfumage des circulations d'un hôpital situé en Île-de-France. Les exigences applicables à ce type d'établissement sont décrites dans le règlement de sécurité incendie des ERP, ainsi que dans l'instruction technique n°246 [3]. Ces textes prescrivent notamment les débits d'extraction des fumées que doivent assurer des installations de désenfumage mécanique installées dans les circulations.

L'établissement étudié présentait un déficit de débit d'extraction dans les circulations de huit niveaux. Face à ce constat, les autorités compétentes demandaient soit une mise en conformité de l'installation de désenfumage, soit la démonstration de la performance de l'installation au moyen d'une ISI. Compte tenu de la complexité technique et économique qu'impliquait une mise en conformité (présence d'amiante, travaux en site occupé), une ISI a été réalisée. L'objectif de l'étude était double :

- comparer la performance de l'installation existante avec une solution réglementaire (approche relative) ;
- vérifier la compatibilité avec la mise en sécurité des patients et du personnel (approche absolue). Cette seconde approche nécessite de prendre en compte les spécificités liées à l'exploitation de ce type d'établissement. En effet, le public présent ne peut, dans une grande majorité, pas évacuer par lui-même. Les règles de mise en sécurité sont donc différentes d'autres types d'ERP, puisqu'elles reposent sur un transfert horizontal des personnes vers d'autres locaux du même niveau.

Ce transfert étant réalisé par le personnel, il est nécessaire d'inclure leur action dans l'analyse et d'évaluer si celle-ci peut être réalisée en sécurité en cas d'incendie.

En suivant la méthodologie générale des études ISI, une analyse préliminaire a été réalisée afin de bien comprendre le contexte, d'identifier les locaux les plus critiques et de recueillir toutes les données nécessaires à l'étude. Cette première étape a permis de poser toutes les hypothèses utiles à la définition des scénarios incendie.

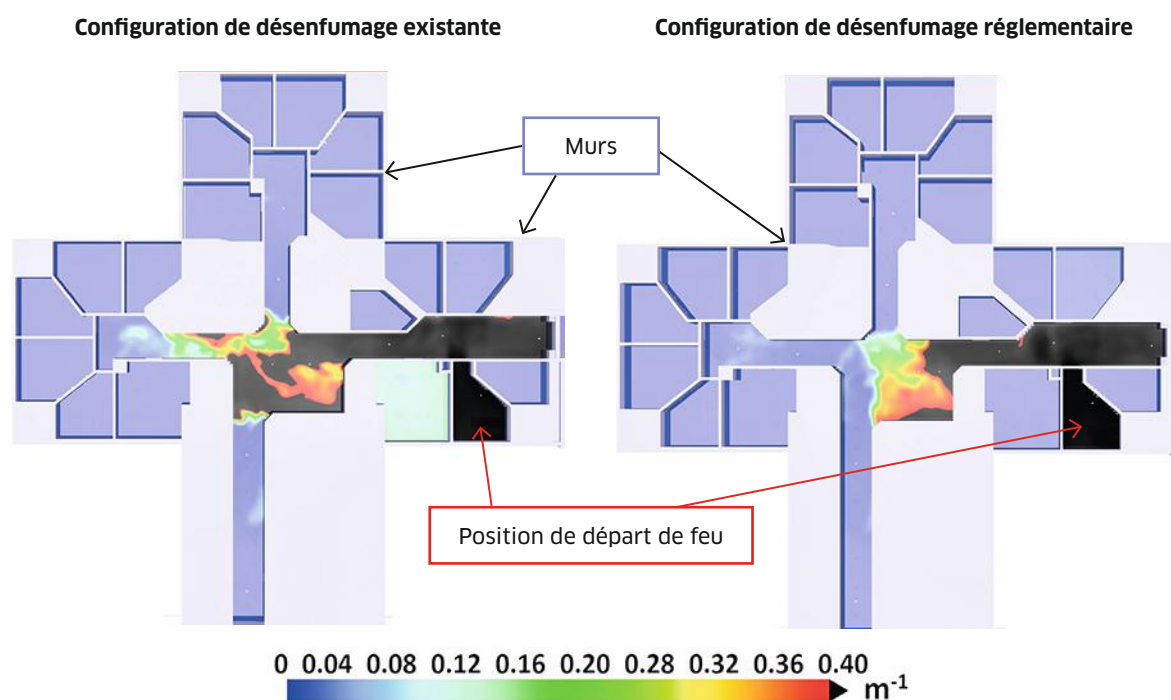
Après avoir bien définis les objectifs, le périmètre et les limites de l'étude, l'analyse de risque réalisée a permis d'identifier les différents scénarios pertinents à simuler afin d'évaluer la performance de l'installation. Ces scénarios étaient :

- un départ de feu dans une chambre avec porte ouverte sur la circulation. Cette configuration est représentative du fonctionnement courant de l'établissement et est considérée comme le scénario le plus réaliste, notamment en considérant l'historique des sinistres récents sur des établissements similaires ;
- un départ de feu dans un local à risque dont la porte est restée ouverte. Ce scénario majorant sert à évaluer la capacité du système à traiter la production d'un grand volume de fumée et de chaleur. Il représente une situation dégradée du fonctionnement de l'établissement, les portes de ce type de local devant normalement rester fermées (présence de ferme-portes). Ce scénario est raisonnablement envisageable car il est souvent constaté des portes maintenues ouvertes en situation réelle d'exploitation ;
- un départ de feu dans une circulation. Ce scénario sert à traiter un cas de figure où un départ de feu de faible puissance (poubelle, chariot...) se produirait et où les fumées se propageraient directement dans la circulation.

Conformément à la démarche administrative prévue pour la réalisation d'études ISI en ERP, les scénarios ont été soumis aux autorités compétentes pour validation avant de pouvoir être mis en œuvre.

Pour chaque scénario, deux simulations ont été réalisées. La première considérait les caractéristiques du système de désenfumage en place. La seconde prenait en compte des débits d'extraction de fumées conformes à la réglementation applicable.

Les résultats obtenus ont montré que, quel que soit le scénario considéré, les conditions d'évacuation se dégradent très rapidement dans les circulations (Cf. Figure 2). Cette dégradation se traduisait par une perte de visibilité liée à la présence de fumées ainsi qu'une augmentation de la température au-delà d'un critère seuil défini à 40°C. Cette dégradation rapide n'était pas compatible avec les



↑ FIGURE 2 Comparaison des conditions de visibilité à 2 m du sol dans deux configurations de désenfumage, cinq minutes après un départ de feu dans une chambre. Les zones noires correspondent à une visibilité réduite (coefficient d'extinction COE < 0,4 m⁻¹).

délais nécessaires pour que le personnel réalise la mise en sécurité des patients, les exposant ainsi tous à un risque important.

Les résultats ont également montré qu'une mise en conformité de l'installation pouvait améliorer légèrement les performances, sans pour autant permettre d'atteindre un niveau compatible avec le transfert horizontal des patients. Il a ainsi été démontré que l'amélioration du niveau de sécurité nécessaire ne pouvait reposer uniquement sur la mise en conformité du système de désenfumage. Des simulations complémentaires ont donc été réalisées afin d'évaluer d'autres solutions visant à améliorer les résultats.

Sur la base des conclusions de l'étude, l'établissement a finalement opté pour la création de recouvrements supplémentaires dans les circulations, permettant d'empêcher la propagation rapide des fumées dans tout le niveau. Il a également été acté de mettre en place des ferme-portes débrayables au niveau des chambres, offrant à la fois la souplesse nécessaire au travail du personnel de santé et le respect de l'intimité des patients, tout en garantissant une mise en sécurité efficace en cas de sinistre. La stratégie de mise en sécurité a été également adaptée en favorisant, lorsque cela est nécessaire et adapté, le confinement des patients dans les chambres au lieu de systématiser leur transfert horizontal.

Enfin, les résultats de simulation et notamment les

animations de propagation des fumées ont également servi à des actions de formation et de sensibilisation du personnel au risque incendie dans l'établissement.

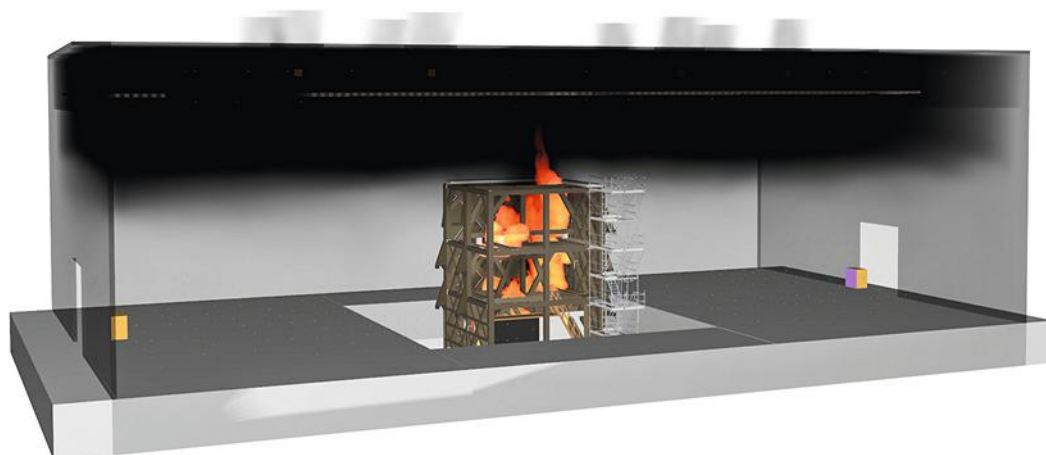
Exemple d'utilisation de l'ISI de désenfumage dans un lieu de travail atypique

Le second exemple concerne un cas particulier de recours à l'ISI où le bâtiment ne présente pas de non-conformité par rapport à la réglementation, mais où une activité exceptionnelle est susceptible de présenter un risque pour le personnel.

Lors du tournage du film « Notre-Dame brûle », Jean-Jacques Annaud a souhaité limiter au maximum le recours aux effets spéciaux numériques pour les scènes incluant du feu. Il a donc eu recours à des effets pyrotechniques lors du tournage de certaines scènes. L'une de ces scènes concerne la progression des pompiers de la Brigade des sapeurs-pompiers de Paris dans le beffroi en flammes. Pour cela, une partie du beffroi a été reconstituée à l'échelle 1:1 dans un studio de la Cité du cinéma. Cette réplique, de 13 m de haut avec une base carrée de 9 m de côté, était équipée de 120 m de rampes de gaz permettant de générer des séquences de flammes au gré des besoins. L'utilisation simultanée de la totalité des rampes était en mesure de générer un foyer de plus de 40 MW, soit l'équivalent d'un feu de poids lourd.

Une étude ISI a été réalisée (Cf. Figure 3) afin de





© CNPP

↑ FIGURE 3 Vue 3D d'un résultat de simulation. Visualisation du volume de flamme formé par les rampes de gaz ainsi que de la stratification et de l'évacuation des fumées dans le studio.

vérifier que ces mises à feu ne présentaient pas de risques pour le personnel présent sur le plateau pendant les scènes (techniciens, cadres, machinistes, acteurs, etc.) ainsi que pour les équipements et structures du bâtiment.

Les mesures destinées à assurer la sécurité incendie sont souvent perçues comme des contraintes pesant sur l'exploitation d'un établissement. Dans le cadre d'un tournage de cinéma, elles peuvent notamment se traduire par une réduction du nombre de prises réalisables chaque jour, entraînant une augmentation de la durée du tournage et une hausse significative des coûts de production. L'un des objectifs de l'étude consistait donc à définir une chronologie optimisée des cycles de mise à feu et des périodes de refroidissement, afin de garantir la sécurité des personnes et des biens, aussi bien durant les scènes qu'entre celles-ci, tout au long de la journée de tournage.

Les résultats ont montré qu'une phase de brûlage de cinq minutes, suivie d'une pause de 10 minutes, suffisaient à garantir la sécurité des personnes et des équipements durant les scènes, tout en assurant le renouvellement de l'air (notamment pour limiter l'exposition des salariés au CO et CO₂) et le refroidissement des éléments de structure entre deux prises. Cette chronologie se révélait par ailleurs compatible avec les exigences et les rythmes de production. Il a également été préconisé de réaliser une pause plus longue au cours de la journée afin de permettre aux éléments de structure les plus massifs de refroidir suffisamment, certains pouvant atteindre près de 200 °C au cœur après plusieurs heures de tournage. Enfin, l'analyse des contraintes thermiques au niveau des équipements situés en partie haute du volume a permis de mettre en évidence un risque de dégradation et de préconiser l'ajout de protections thermiques (plaques de plâtre ou couvertures) afin de les protéger.

L'étude ISI a ainsi permis de définir une organisation de tournage à la fois sécurisée et compatible avec les impératifs de production.

Conclusion

L'ingénierie de sécurité incendie constitue une approche performancielle complémentaire à une réglementation prescriptive, notamment lorsque les situations sont complexes ou atypiques. En s'appuyant sur des simulations numériques de scénarios incendie représentatifs, elle permet d'évaluer de manière objective la performance réelle des mesures de prévention mises en œuvre et d'adapter les solutions aux risques et aux contraintes spécifiques des établissements. ●

1. Les critères utilisés pour quantifier la performance sont généralement tirés du « Guide de bonnes pratiques pour les études d'ingénierie du désenfumage » [4]. D'autres critères peuvent être utilisés, en fonction des objectifs de l'étude.

BIBLIOGRAPHIE

[1] NORME NF ISO 23932-1 – Ingénierie de la sécurité incendie - Principes généraux. Partie 1 - Généralités. Afnor, 2019. Accessible sur : <https://www.boutique.afnor.org/fr> (site payant).

[2] FDS-SMV – Fire dynamics simulator. Accessible sur : <https://pages.nist.gov/fds-smv/> (consulté en nov. 2025).

[3] INSTRUCTION TECHNIQUE MINISTÉRIELLE N° 246, relative au désenfumage des établissements recevant du public (ERP) du 25 juin 1980. Accessible sur : <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000000436811> (Cf. Annexe III de l'arrêté du 22 mars 2004).

[4] LABORATOIRE CENTRAL DE LA PRÉFECTURE DE POLICE – Guide de bonnes pratiques pour les études d'ingénierie du désenfumage. 2017. Accessible sur : <https://www.prefecturedepolice.interieur.gouv.fr>