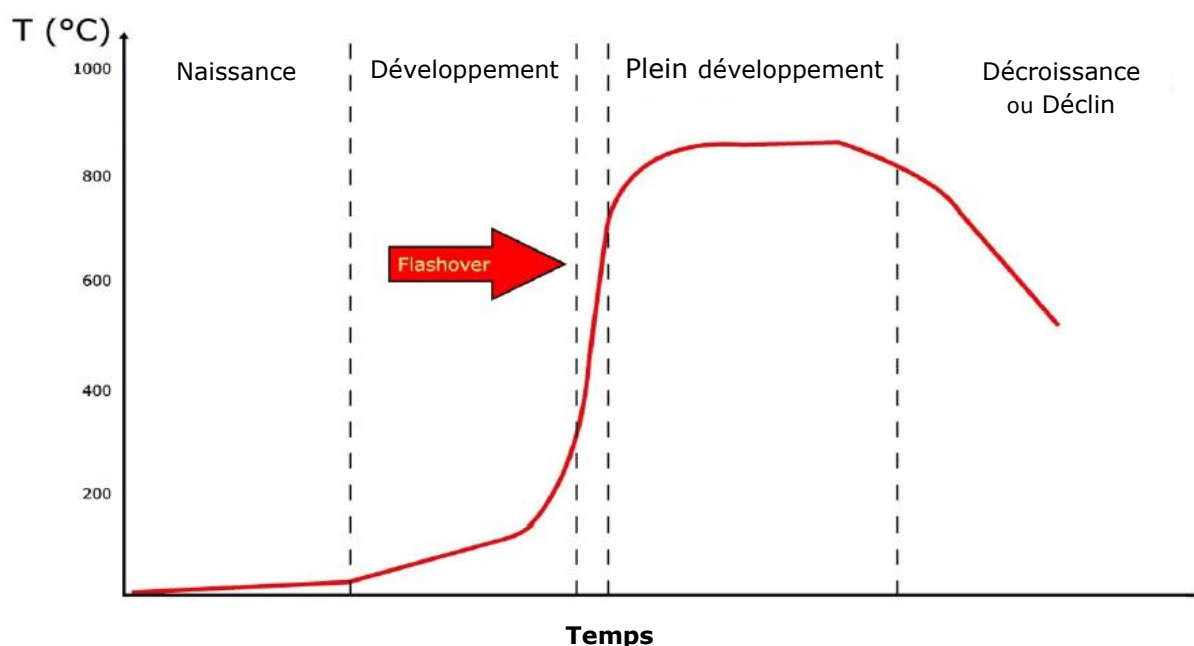


# La courbe de croissance du feu revisitée

## 1 Introduction

Tout pompier connaît la courbe de croissance du feu qui est enseignée dans la formation de base des pompiers. Alors qu'auparavant, il n'y avait qu'une seule courbe de croissance du feu, il y en a maintenant deux. La première est l'ancienne courbe, définie par le terme "*feu ventilé*" (voir figure 1). Le présent article traite de cette courbe. Elle représente un incendie dans une pièce dans les conditions suivantes :

- Une charge combustible suffisante, située au bon endroit dans la pièce
- Une ventilation suffisante



**Figure 1** La courbe de croissance du feu ventilé (figure : Karel Lambert)

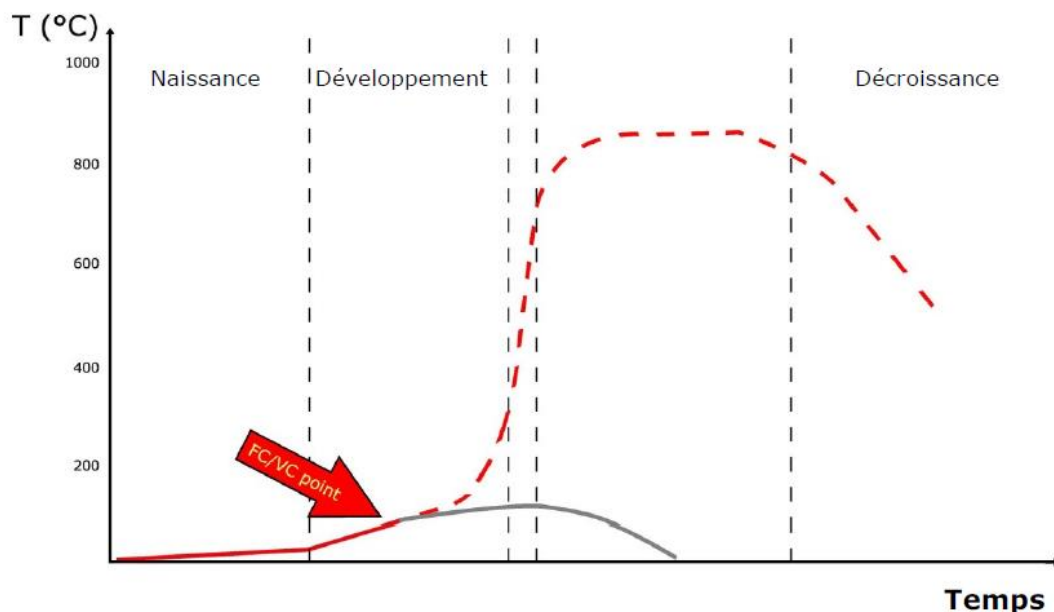
Il arrive souvent qu'un feu s'éteigne de lui-même parce que l'objet initial qui a pris feu est incapable de produire un taux de dégagement de chaleur (*HRR*) suffisamment élevé pour enflammer un autre objet inflammable à proximité. Dans ces cas, il y a souvent beaucoup de fumée, mais presque pas de chaleur. Il y a donc suffisamment de combustible disponible pour permettre au feu de progresser jusqu'au flashover, mais la disposition du paquet de combustible empêche que cela ne se produise. Le feu s'éteint au stade naissant.

Tout récemment, les pompiers d'Oostkamp se sont retrouvés face à un tel incendie. Ils ont été dépêchés sur les lieux d'un incendie dans une maison qui avait piégé toute une famille au premier étage du bâtiment. À leur arrivée, tout le rez-de-chaussée s'est avéré être rempli de fumée. La fumée bloquait l'issue de secours des occupants, qui se trouvaient au premier étage. De plus, les fenêtres du premier étage étaient toutes à simple vitrage. Le feu semblait être sous-ventilé et les équipes d'incendie ont reconnu que le fait de briser les fenêtres pouvait entraîner un flashover provoqué par la ventilation. Une attaque intérieure a été initiée en utilisant des lignes d'attaque de 45 mm. Pendant l'avancée de la ligne

d'attaque, il s'est avéré que la fumée dans le salon n'était pas du tout chaude. La fumée froide peut être la conséquence d'un feu sous-ventilé. En raison d'un manque d'air, le taux de dégagement de chaleur du feu est très faible (voir figure 2). Cela signifie que très peu de chaleur s'est accumulée. Grâce à la Caméra à Imagerie Thermique (TIC), les équipes ont pu trouver le foyer de l'incendie. La source était un hoverboard qui avait été laissé en charge. L'objet était situé à côté d'une armoire en chêne massif. L'armoire était bien sûr noircie et brûlée, mais le HRR de l'hoverboard en feu était insuffisant pour enflammer complètement l'armoire en bois. L'hoverboard avait complètement brûlé et était entré dans sa phase de décomposition. Le feu avait produit une grande quantité de fumée, mais très peu de chaleur. Grâce à un ventilateur, la fumée a pu être évacuée du bâtiment et la famille a été sauvée de cette situation. Même si la fumée n'était pas chaude, les niveaux de toxicité étaient suffisamment élevés pour qu'il ne soit pas possible de s'enfuir à travers celle-ci sans appareil respiratoire.

Ce scénario aurait pu cependant se dérouler de manière complètement différente. De l'autre côté du salon se trouvait la boîte en carton dans laquelle l'hoverboard était habituellement stocké. Ce carton se trouvait à côté d'un grand canapé de trois places. Supposons un instant que l'hoverboard ait été placé à l'intérieur ou sur le dessus de la boîte et qu'il ait pris feu. Selon toute vraisemblance, le canapé aurait également pris feu. Le canapé aurait généré suffisamment de HRR pour provoquer un flashover dans le salon. En arrivant, les pompiers auraient été confrontés à un grand incendie au rez-de-chaussée. La température de la fumée provenant d'un tel feu et se propageant au premier étage serait dix fois plus élevée. On ne peut que deviner si les portes des chambres auraient protégé la famille suffisamment longtemps en attendant que les secours arrivent.

La seule variable qui diffère dans ces deux cas est le placement de l'hoverboard (l'objet initial en feu) au moment de l'ignition. Tout le reste du contenu de la salle de séjour reste le même. Un des scénarios entraîne une grande quantité de dégâts dus à la fumée, l'autre conduit à l'incendie d'une maison et peut-être à la mort de plusieurs victimes. Pour qu'un feu ventilé atteigne le flashover, il faut qu'il y ait suffisamment de combustible dans la disposition appropriée.



**Figure 2** Lorsque l'air est insuffisant, le feu passe de la courbe rouge à la courbe grise. C'est ce qu'on appelle un feu sous-ventilé. (Figure : Karel Lambert)

Lorsque la ventilation est insuffisante et que le flashover ne peut se produire, il s'agit alors d'un *feu sous-ventilé*. Le feu restera petit jusqu'à ce qu'il s'éteigne de lui-même ou que des ouvertures de ventilation supplémentaires soient créées. Ce feu aura une courbe différente, illustrée par la figure 2.

Cet article porte cependant sur le feu ventilé, comme le montre la figure 1. Cette courbe est connue par la plupart des pompiers comme une courbe de température. Ce type de courbe illustre l'évolution de la température en fonction du temps. Plusieurs questions peuvent être posées à propos de cette affirmation : *Quelle température exactement est illustrée par la courbe ?* Ou en d'autres termes : *À quel endroit devons-nous placer un thermomètre pour que les températures mesurées soient celles indiquées par le graphique susmentionné ?* Beaucoup de pompiers ne peuvent pas répondre à cette question.

*Connaissez-vous la bonne réponse ? Cet article s'adressera directement au lecteur occasionnel. Essayez de réfléchir à la question avant de lire la section suivante. Le texte confirme-t-il votre réponse ? Bien ! Si ce n'est pas le cas, réfléchissez aux raisons pour lesquelles votre réponse était incorrecte. Dans les deux cas, vous aurez appris quelque chose.*

## 2 Taux de dégagement de chaleur d'un incendie

Chaque feu produit un certain taux de dégagement de chaleur. Ce taux peut être décrit comme suit : Imaginez un canapé à trois places. Supposons que le canapé s'enflamme à cause d'une cigarette oubliée. Sur l'assise du canapé, une surface d'un quart de mètre carré brûle. Les flammes s'élèvent à environ 50 cm du canapé. *Pouvez-vous voir l'image dans votre esprit ?*

La chaleur des flammes s'écoulera en grande partie vers le haut. Là, elle réchauffera la couche de fumée. Une partie de la chaleur est renvoyée vers le canapé. Le canapé se réchauffe alors. La température élevée du canapé (charge de combustible) provoquera la pyrolyse d'une partie du canapé. Cela signifie que le canapé perd une partie de sa masse. Si le canapé était posé sur une balance, nous verrions le poids diminuer lentement. Le terme scientifique pour cela est le *taux de perte de masse* (en kg/s). Plus le combustible est chaud, plus les gaz de pyrolyse se forment rapidement (et plus le poids sur la balance diminue rapidement). Les gaz de pyrolyse ne sont rien d'autre que du combustible gazeux. Les flammes sont alimentées par ces gaz de pyrolyse. Les flammes brûlent les gaz de pyrolyse en utilisant l'oxygène de l'air ambiant.

Un poêle à gaz fonctionne en ouvrant un robinet. Ensuite, le gaz sortant est allumé par une étincelle. En manipulant le robinet, une flamme plus ou moins grande se forme. Dans un vrai feu, la fonction du robinet est prise en charge par la chaleur qui s'applique sur la charge de combustible. Plus le combustible est chaud, plus il y a de gaz de pyrolyse qui sont libérés par seconde. Plus il y a de gaz de pyrolyse par seconde, plus le taux de dégagement de chaleur est élevé.

La section ci-dessus ne s'applique qu'aux feux contrôlés par le combustible. Dans ces feux, l'air (oxygène) est abondant. Le taux de dégagement de chaleur du feu dépendra de la quantité de gaz de pyrolyse (le taux de perte de masse). Lorsqu'un feu devient contrôlé par la ventilation, cela signifie qu'il n'y a pas assez d'air pour brûler tous les gaz de pyrolyse.



Une partie de ces gaz sera ajoutée à la couche de fumée. Cela signifie que des particules non brûlées s'accumulent dans la couche de fumée. Le taux de dégagement de chaleur du feu est limité par l'air disponible. C'est ce que montre la figure 2, où le feu passe de la courbe rouge à la courbe grise. Cependant, cela se produit également dans la figure 1. Juste avant que la courbe n'atteigne son sommet horizontal, le feu est devenu contrôlé par la ventilation. Les deux courbes d'incendie ont une section qui est contrôlée par la ventilation. Le graphique de la figure 1 pourrait également être décrit comme un *graphique du taux de dégagement de chaleur - temps*. Ce graphique montre comment le taux de dégagement de chaleur progresse en fonction du temps. La figure 1 montre l'étape initiale. Ce stade est contrôlé par le combustible et se caractérise par un HRR très limité. Le feu reste contrôlé par le combustible tout au long de la phase de croissance mais devient contrôlé par la ventilation pendant le flashover. Le feu pleinement développé est contrôlé par la ventilation. La section horizontale du graphique pendant le stade de plein développement est une conséquence directe du fait que seule une quantité limitée d'air peut entrer dans la pièce par la ou les ouvertures de ventilation.



### 3 Quelles sont les informations qui peuvent être extraites de la courbe de feu ?

Regardez le feu illustré par la figure 3. Il s'agit clairement d'un feu pleinement développé. Le feu a été ventilé par deux fenêtres qui se trouvent l'une à côté de l'autre. Les deux fenêtres sont de la même hauteur et de la même surface.

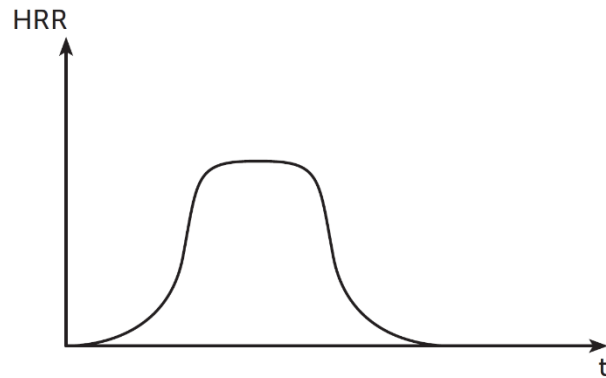
Supposons que ces fenêtres soient reliées à un salon et que la porte du salon soit fermée. Les deux fenêtres seraient alors les seules ouvertures de ventilation pour le feu sur la photo. Le salon contient une grande quantité de combustible : des canapés, une table basse, des armoires remplies de livres, une télévision, ... Il est clair que toute la pièce est en feu. Le HRR de l'incendie est limité par la quantité d'air qui entre dans la pièce. C'est un exemple typique d'incendie contrôlé par la ventilation.

Ce feu a commencé petit, bien sûr. Par souci de simplicité, nous supposons dans ce raisonnement que les deux fenêtres étaient ouvertes au départ. Supposons que le feu ait démarré sur un canapé de trois places. Au début, il n'y a qu'un HRR limité. Au fur et à mesure que le feu se développe, le HRR augmentera.



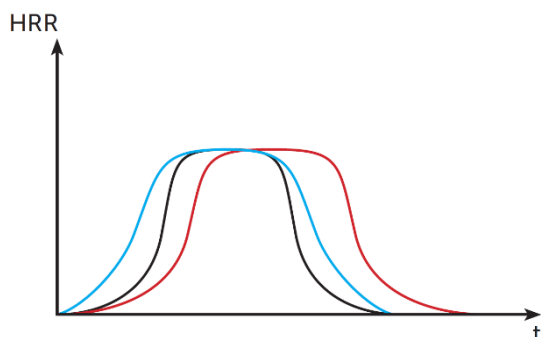
**Figure1** Une vue d'un feu pleinement développé s'échappant par deux fenêtres. (Photo : [www.nufoto.nl](http://www.nufoto.nl))

La figure 4 montre l'évolution du HRR au fil du temps. Le feu commence petit, grandit, atteint le flashover et devient pleinement développé (la ligne horizontale). Au bout d'un certain temps, la quantité de combustible aura été fortement réduite. Une grande partie du combustible aura brûlé. Cela signifie qu'en raison du taux de perte de masse, il restera très peu de combustible. Une grande quantité de combustible aura été transformée en gaz de pyrolyse. Il est raisonnable de supposer que la phase de décroissance commencera lorsque 70% de la charge de combustible aura brûlé. La quantité de gaz de pyrolyse (par seconde) diminue car il ne reste pratiquement plus de combustible. À un moment donné, il y aura à nouveau suffisamment d'air qui circulera par les ouvertures pour brûler tous les gaz de pyrolyse. Le feu sera redevenu contrôlé par le combustible. Au fur et à mesure que la pyrolyse diminue, le HRR diminue également. Après un certain temps, le feu s'éteindra de lui-même. La production de gaz de pyrolyse sera devenue si faible qu'une combustion sous forme de flammes ne pourra plus être supportée. Le combustible restant continuera à couler, mais avec le temps, tout se refroidira et le feu s'éteindra complètement.



**Figure 2** Taux de dégagement de chaleur en fonction du temps dans un feu ventilé. (Dessin : Karel Lambert)

Supposons que le feu ait pris dans un autre salon, dans une maison construite exactement de la même façon et de la même taille que le premier salon. Supposons que la charge de combustible soit identique et que les meubles (canapé, table, ...) se trouvent exactement au même endroit. Le feu s'allume exactement de la même façon, une cigarette dans le canapé. Tout est identique au premier scénario, sauf une chose : il n'y a qu'une seule fenêtre au lieu de deux. La surface des fenêtres est égale à la moitié de celles de l'incendie précédent. Quel est l'effet de cette situation sur le HRR ? L'incendie va-t-il se développer plus lentement que lorsqu'il y avait deux fenêtres ? Ou progressera-t-il plus rapidement d'une manière ou d'une autre ?



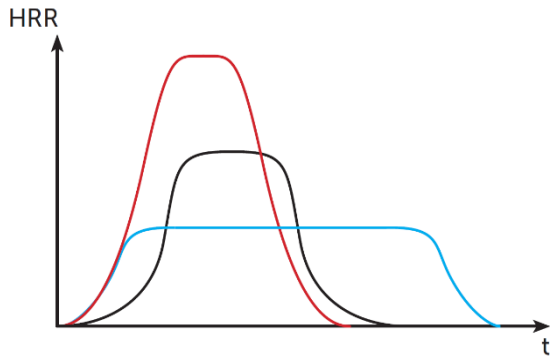
**Figure 3** Deux variantes possibles d'un graphique HRR pour un incendie avec une seule fenêtre au lieu de deux. (Figure : Karel Lambert)

La figure 5 comporte une courbe noire montrant la progression de l'incendie lorsque deux fenêtres étaient ouvertes.

Le graphique bleu indique un incendie qui progresse plus rapidement.

Le graphique rouge est un feu qui progresse plus lentement. Lequel des deux est le bon ? Ou les deux se trompent peut-être ?

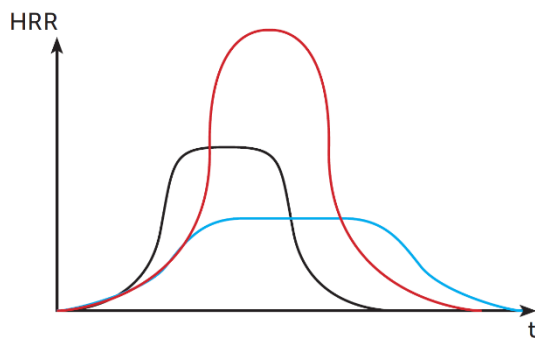
*Essayez de penser à des arguments pour soutenir votre position.*



**Figure 4** Deux autres issues possibles pour le HRR de l'incendie lorsqu'il n'y a qu'une seule fenêtre au lieu de deux. (Figure: Karel Lambert)

plus élevé. Cela lui permet de brûler moins longtemps dans le temps. L'un de ces deux graphiques est-il la représentation correcte d'un incendie dans un salon avec une fenêtre ouverte ?

*Encore une fois, pensez à des arguments pour étayer votre raisonnement.*



**Figure 5** Deux nouvelles variantes possibles pour le même feu. (Figure : Karel Lambert)

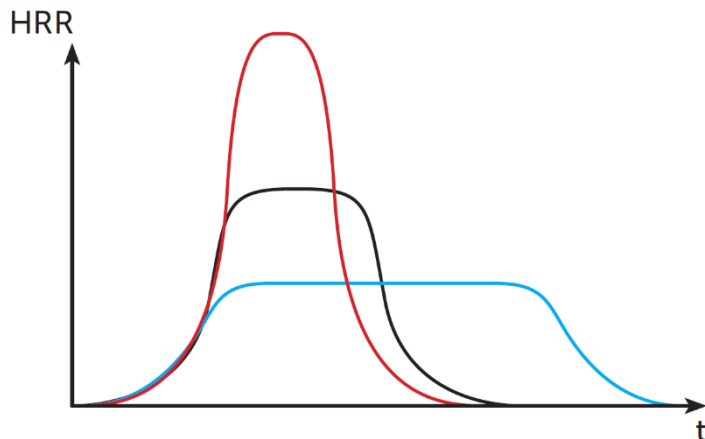
Les figures 5, 6 et 7 représentent toutes des feux qui se développent plus rapidement ou plus lentement que le feu représenté par la courbe noire. Cependant, il se peut facilement que la croissance du feu ne soit pas affectée par l'absence d'une seconde fenêtre ouverte. La figure 8 illustre deux de ces possibilités. La courbe bleue est exactement la même que la courbe noire dans les phases initiales. Cela signifie que le feu

Il est également possible d'obtenir deux graphiques qui progressent tous deux plus rapidement, mais dont le HRR est soit supérieur, soit inférieur. La figure 6 montre ces deux graphiques. La courbe noire représente toujours le feu dans le salon avec deux fenêtres ouvertes. La courbe bleue illustre un feu qui se développe plus rapidement, mais qui s'arrête aussi rapidement de croître et continue de brûler à un HRR plus bas. Le feu maintient ce stade pendant une période plus longue.

La courbe rouge illustre un feu qui se développe plus rapidement et qui, en plus, atteint un HRR

Figure 7 illustre une variante de la figure 6. Cette fois, les courbes rouge et bleue représentent des feux qui se développent plus lentement que le feu dans le salon avec deux fenêtres ouvertes (la courbe noire). Tout comme dans la figure 6, la courbe bleue se termine à un HRR inférieur à celui de la courbe noire. La courbe rouge atteint un HRR plus élevé que la courbe noire. L'une de ces courbes est-elle peut-être la bonne ?

*C'est à vous d'y réfléchir de manière critique et de formuler une réponse.*



**Figure 6** Encore deux représentations possibles du HRR d'un incendie avec une fenêtre ouverte au lieu de deux. (Figure : Karel Lambert)

se développe exactement de la même manière. Cependant, le feu devient moins intense (pic HRR inférieur) à un stade ultérieur. La courbe rouge a également la même croissance que la courbe noire, mais elle se termine par un HRR de pointe plus élevé que le feu avec deux fenêtres ouvertes. Peut-être que le bon graphique se trouve ici ? Ou peut-être y a-t-il une autre possibilité qui n'a pas encore été évoquée.

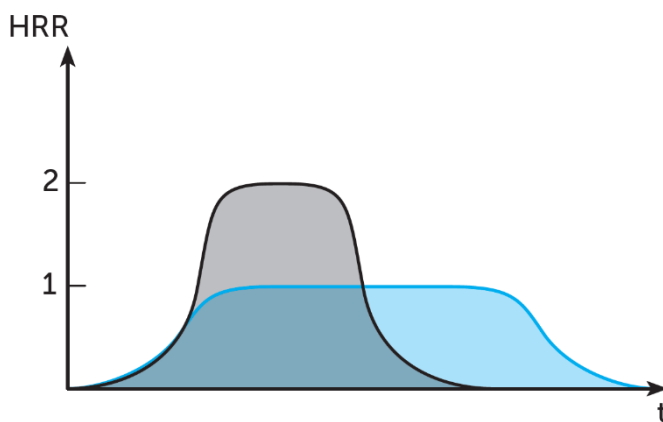
*Réfléchissez à votre réponse et aux raisons pour lesquelles vous pensez qu'elle est correcte.*

#### 4 L'effet d'une fenêtre au lieu de deux.

La courbe noire illustre la progression du HRR d'un incendie par rapport au temps, pour un incendie dans un salon avec deux fenêtres ouvertes. La première partie de la courbe représente le stade de naissance et de croissance de l'incendie. Le feu est contrôlé par le combustible à ce moment. Cela signifie qu'il y a suffisamment d'air pour brûler les gaz de pyrolyse qui sont produits. Si la taille des ouvertures de ventilation devait être augmentée, cela n'affecterait pas la croissance du feu. Après tout, il y a déjà suffisamment d'air. La réduction de la taille des ouvertures de ventilation n'aura pas non plus d'effet au début de l'incendie. Tant qu'il y a suffisamment d'air qui entre par l'ouverture pour brûler les gaz de pyrolyse qui se forment, le feu sera contrôlé par le combustible et cela signifie qu'il n'y a pas d'effet d'une ventilation accrue.

Un feu contrôlé par le combustible ne brûlera pas plus vite ou plus lentement au début en ayant une fenêtre ouverte au lieu de deux. Les courbes des deux feux (deux fenêtres et une fenêtre) sont congruentes.

Le feu dans le salon avec une fenêtre ouverte passera également au flashover. L'air qui pénètre dans la pièce par la fenêtre ouverte est suffisant pour permettre au feu de se développer. Gardez à l'esprit que la surface de la fenêtre ouverte doit rester supérieure à une certaine taille minimale. Le feu dans le salon doit pouvoir se développer jusqu'à une certaine HRR pour atteindre le flashover dans la pièce. Supposons que les deux fenêtres de la figure 3 soient remplacées par une fenêtre d'un quart de la surface de la fenêtre d'origine, alors le feu serait probablement contrôlé par la ventilation avant que le flashover ne puisse se produire. Nous avons alors à faire à un incendie sous-ventilé. La figure 2 pourrait être une illustration possible de ce scénario.



**Figure7** Le graphique bleu ne produit que la moitié du HRR maximum du graphique noir. De ce fait, le combustible est consommé plus lentement et le graphique est environ deux fois plus long. (Figure : Karel Lambert)

Lorsque la surface des fenêtres du salon du second scénario est la moitié de celle du premier, alors seule la moitié de la quantité d'air pourra entrer. Cela signifie que le HRR produit par le second feu sera la moitié de celui du premier feu. La courbe bleue de la figure 8 illustre la bonne réponse. La hauteur de la ligne horizontale (HRR de pointe) est déterminée par la surface totale des fenêtres ouvertes. Elles déterminent la quantité d'air qui peut entrer à un moment donné, et donc le HRR maximal. La hauteur de la partie



horizontale de la courbe bleue doit être exactement la moitié de celle de la courbe noire. Si quatre fenêtres devaient être ouvertes au lieu de deux, alors la courbe rouge de la figure 8 serait la bonne. Un HRR d'exactly deux fois la taille du feu "noir" devrait être atteint.

Enfin, il est important de réaliser que la surface sous les courbes représente la charge de combustible. C'est pourquoi la courbe bleue de la figure 8 est plus longue que la courbe noire (et la courbe rouge est plus étroite). Lorsque le HRR n'est que la moitié de celui de la courbe noire, alors seulement la moitié du combustible sera brûlée à un moment donné. Cela signifie que la charge de combustible durera deux fois plus longtemps. Un exemple parfait pour illustrer cela est un poêle à bois. Un nombre quelconque de bûches de bois peut être placé dans le poêle pour alimenter le feu. Mais lorsque l'entrée d'air est réduite de moitié, la chaleur produite par le poêle diminue (parce que le HRR a été réduit de moitié). La quantité de bois dans le poêle durera deux fois plus longtemps.

C'est ce que montre clairement la figure 9. La surface marquée en gris doit être égale à celle marquée en bleu. Après tout, elles représentent exactement la même charge de combustible. Dans le feu "noir", il y a deux fois plus d'air disponible et la charge de combustible est donc consommée deux fois plus vite. Cela conduit à un feu qui ne dure que la moitié du temps (mais qui est deux fois plus intense).

## 5 Bibliographie

- [1] *Lambert Karel, Baaij Siemco (2018) Comportement du feu: point de vue technique, application tactique, 2e édition, Sdu*
- [2] *Lambert Karel (2009-2019) Cours d'instructeur CFBT pour la cellule d'attaque, CFBT-BE*
- [3] *McDonough John (2009-2019) entretiens personnels*
- [4] *Grimwood Paul (2008-2019) entretiens personnels*

Karel Lambert

