

# Effet de la teneur en eau sur la propagation d'un feu de surface à travers une strate de végétation homogène

D. MORVAN, A. LAMORLETTE

Université d'Aix-Marseille Laboratoire de Mécanique Modélisation & Procédés Propres (M2P2)  
UMR CNRS 7340 UNIMECA 60 Rue Joliot Curie Technopôle de Château Gombert  
13453 Marseille cedex 13 (FRANCE)

## Résumé :

*Cette étude porte sur le comportement d'un feu de surface se propageant à travers une strate de végétation homogène. Ce problème a été étudié par simulation numérique, à partir d'une formulation CFD multiphasique, qui consiste à résoudre les équations de bilan (masse, mouvement, énergie) du système couplé formé par la strate de végétation et la couche atmosphérique environnante. Parmi les phénomènes physiques pris en compte, la combustion en phase gazeuse est résolue en supposant que le taux de réaction est piloté par la vitesse de mélange des produits de pyrolyse avec l'air environnant. Le couplage turbulence/rayonnement est partiellement intégré à partir d'un modèle basé sur une hypothèse d'épaisseur optique des structures turbulentes petite devant l'unité ('Optically Thin Fluctuation Approximation'). L'étude est focalisée sur l'effet de la teneur en eau du combustible sur la dynamique de propagation du feu. Les résultats sont analysés en termes de temps de résidence, profondeur et vitesse de propagation du front, courbe de distribution des fractions massiques d'H<sub>2</sub>O et d'O<sub>2</sub>, pour deux valeurs de la vitesse du vent. Les résultats numériques ont permis de montrer que la teneur en eau du combustible pouvait affecter la propagation du front de deux manières : par contraction de la profondeur du front de combustion (propagation limitée par la pyrolyse) et par dilution des gaz frais qui alimentent en oxygène le foyer. Ces deux mécanismes pouvant conduire chacun à l'arrêt de la propagation et à l'extinction du front d'incendie.*

## Abstract :

*This study concerns the behaviour of surface fires in propagation through a homogeneous stratum of vegetation. This problem has been studied using numerical simulations and a multiphase CFD formulation, which consists in solving the set of balance equations (mass, momentum, energy) governing the evolution of the coupled system formed by the vegetation and the surrounding atmosphere. Among the physical phenomena taken into account, the homogeneous combustion in the gas phase was calculated in assuming that the reaction rate was limited by the mixing between the pyrolysis products (gaseous combustible part) and the ambient air. The turbulence/radiation interaction (TRI) has been partially integrated, assuming that the optical thickness of turbulent structures was smaller than unity (Optically Thin Fluctuation Approximation). The present study was focussed on the effect of fuel moisture content on the fire dynamics. The results have been analysed in terms of fire residence time, fire front depth and fire rate of spread, H<sub>2</sub>O and O<sub>2</sub> mass fraction distribution. Two wind speed velocities have been tested. The numerical results highlighted that the fuel moisture content can affect the propagation of the fire in two manners: by the collapse of the fire front depth (fuel limited regime) and by dilution of the fresh air supplying the combustion reaction (oxygen limited regime). Both of these two mechanisms can stop and extinguish the fire.*

**Mots clefs:** feux de forêt, teneur en eau, propagation, simulation numérique, combustion

## 1 Introduction

Avec le vent et la pente, la teneur en eau de la végétation (FMC), définie comme le rapport entre la masse d'eau contenu dans le combustible et sa masse sèche, est certainement l'un des principaux facteurs affectant les conditions d'ignition et de propagation des feux de forêt [1,2]. La réduction du risque feu de forêt passe en grande partie par une réduction de la biomasse au sol (strate herbacée et arbustive). Au niveau des

interfaces forêt habitats, les techniques de débroussaillage mécanique sont souvent privilégiées. A grande échelle les brûlages dirigés représentent une des approches les plus efficaces de gestion du combustible. Pour éviter qu'un brûlage dirigé ne se transforme en feu incontrôlé et pour réduire l'impact thermique sur le sol (en particulier sur les banques de graines et plus généralement sur toute activité biotique), ces brûlages dirigés doivent être conduits dans des conditions proches des conditions marginales de propagation, caractérisées par une teneur en eau du combustible (FMC) relativement élevée. Les garanties de succès de ce type d'opération sont basées sur des prescriptions qui définissent les conditions optimales de réalisation en termes de teneur en eau, de vitesse du vent, nature du combustible et configuration du terrain [1,3,4,5]. La teneur en eau caractérisant une végétation, résulte principalement de quatre facteurs : la température et l'humidité relative de l'air ambiant, la date des dernières précipitations et la nature du sol [4,6]. Pour des valeurs relativement faibles de l'humidité relative (RH), la relation qui lie FMC avec RH est approximativement linéaire et forme un réseau de courbes parallèles si la température de l'air varie [2]. Cependant, si le domaine de variation de RH devient plus étendu, cette dépendance devient plus complexe et les courbes FMC versus RH mettent en évidence un comportement non linéaire, comme cela a été observé dans des litières d'Eucalyptus [7]. L'effet de la teneur en eau sur le comportement d'un feu de végétation est très souvent résumé à travers la relation qui lie le rapport de vitesse de propagation observée (ROS) avec celle qui serait obtenue si la teneur en eau était réduite à zéro ( $ROS_0$ ). Très souvent les résultats obtenus sur des feux de terrain [8] ou des essais en laboratoire [9] mettent en évidence une décroissance exponentielle du ROS en fonction de la FMC. D'autres études suggèrent que le domaine de validité de cette loi est limité aux valeurs relativement faibles de la FMC (inférieure à 12%) et montrent que la relation tend par la suite vers une décroissance linéaire [10] telle que celle qui peut être mise en évidence à travers un simple bilan thermodynamique [11]. L'intensité du vent ambiant affecte bien entendu de manière très significative cette relation, des données expérimentales obtenues en tunnel à feu [12], ainsi que des résultats de simulation numérique [11] ont mis en évidence une relation inverse à un polynôme fonction de la FMC. La teneur en eau d'extinction (au dessus de laquelle la propagation d'un feu sans vent et sur terrain plat devient très erratique) fait également partie des paramètres souvent étudiés. Des valeurs comprises entre 20 et 25% pour les prairies sont souvent citées, pour des strates arbustives (et avec l'aide du vent) cette valeur peut atteindre 90%. Cette disparité de données, montre que la structure de la végétation (en particulier l'indice foliaire ou LAI) et la manière dont l'eau est stockée dans le combustible végétal affecte ce seuil d'ignition et plus généralement la dynamique du feu [13,14]. L'objectif de cet article était de clarifier le rôle joué par la teneur en eau sur la propagation d'un feu de surface se propageant à travers un couvert végétal de type prairie et en particulier d'étudier l'effet du vent sur les conditions marginales de propagation, la loi d'amortissement de la FMC sur la vitesse de propagation. Pour atteindre cet objectif les calculs ont été réalisés sur un terrain plat et pour deux conditions de vent (calme  $U_{10} = 1$  m/s et faible  $U_{10} = 4$  m/s) ( $U_{10}$ : vitesse du vent mesurée à 10m au dessus du sol), représentatives des deux régimes de propagation identifiés pour la propagation des feux de surface : piloté par le panache thermique (« plume dominated ») et par le vent (« wind driven »).

## 2 Modélisation physique

Le comportement d'un feu de surface se propageant à travers une strate de végétation homogène dont les propriétés physiques ont été résumées dans le tableau 1, a été étudié par simulation numérique. La modélisation mise en œuvre est basée sur une approche multiphasique, dans laquelle la strate de végétation est traitée comme un milieu poreux équivalent immergée dans un écoulement de type couche limite atmosphérique. Cette formulation permet d'intégrer différents modes d'interaction végétation/atmosphère : échange de quantité de mouvement par des termes de traînée distribués en volume, échange de chaleur par convection et rayonnement, échanges de masse par dégradation de la végétation (séchage, pyrolyse, combustion hétérogène) sous l'action du flux intense de chaleur dégagée par le front d'incendie. En phase gazeuse, la turbulence est modélisée à partir d'un modèle de type K- $\epsilon$  RNG, le taux de combustion en phase gazeuse est calculé par une approche de type EDC (Eddy Dissipation Concept) et les transferts d'énergie par rayonnement (suies et braises) par une méthode d'ordonnées discrètes (DOM). Les équations de transport en phase gazeuse sont résolues par une méthode aux volumes finis, associant un schéma décentré d'ordre 3 en espace (QUICK avec méthode ULTRA-SHARP) et un schéma d'Euler d'ordre 2 en temps. L'interaction turbulence/rayonnement a été partiellement prise en compte à partir d'un modèle basé sur une hypothèse de turbulence optiquement mince ('Optically Thin Fluctuation Approximation'). Pour plus de détails concernant

la modélisation le lecteur est invité à consulter les références [11,15,16].

Les simulations numériques ont été réalisées dans un domaine 2D XZ (X : direction de propagation et Z : direction verticale), de 170m de long sur 35m de haut. Même si un front d'incendie présente un comportement tridimensionnel, ces effets 3D sont surtout marqués si le front est d'envergure limitée (effets de bord), si le vent est fort ou si le feu se propage sur un terrain en forte pente. L'hypothèse restrictive d'un domaine 2D (associée à un front d'envergure infinie) a semblé suffisante pour dégager les tendances générales des effets de la teneur en eau sur la propagation du feu par vent faible et sur un terrain plat. Pour un calcul 2D le front de flamme se comporte vis-à-vis de l'écoulement incident comme un obstacle, alors que pour un calcul 3D le vent incident a la possibilité de contourner latéralement le front de flamme en partie haute au dessus du couvert végétal (le front de flamme dans le couvert conservant pour l'essentiel une structure uniforme). Le début de la strate de combustible homogène a été positionné à 20m de l'entrée du domaine. Le combustible est enflammé à son extrémité en activant un brûleur numérique (injection de CO à 1600 K) pendant une courte durée (au plus quelques secondes).

Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	500
Fraction volumique x 10 <sup>3</sup>	2
Teneur en eau (FMC) (%)	5-120
Hauteur de végétation (m)	0.7
Charge de combustible (t/ha)	7
Rapport surface/volume (m <sup>-1</sup> )	4000
Indice foliaire (LAI)	2.8

Table 1: Propriétés physiques de la strate combustible.

### 3 Résultats et discussion

Un premier résultats reporté sur la Figure 1, montre un champ de température (phase gazeuse) et les lignes de courant obtenus en cours de propagation (orientée de gauche à droite) pour un vent de 1 m/s (orienté dans le sens de la propagation du feu) et une teneur en eau de 10%. Il met en évidence que par vent faible la trajectoire des flammes et du panache est peu affectée par l'écoulement incident du vent. Le front reste pratiquement vertical et le champ de vitesse (voir les lignes de courant) semble principalement gouverné par le panache thermique, sous les effets de la poussée d'Archimède l'air frais est aspiré de manière symétrique de part et d'autre du front. Les courbes d'évolution au cours du temps de la température du gaz en différents points situés dans la végétation (à 0.25m au dessus du sol) le long de la trajectoire du feu (le point positionné à X = 20m est situé juste au dessus du brûleur) sont présentées sur la Figure 2. L'intervalle de temps au cours duquel la température du gaz est supérieure à 700 K (début de la combustion en phase gazeuse) est mesuré à partir de ces courbes (Figure 2) pour évaluer le temps de résidence du feu ( $\tau_{\text{Fire}}$ ). En plus de la vitesse de propagation (ROS) un troisième paramètre permet de caractériser le comportement du front de flamme : sa profondeur  $D_{\text{Fire}}$ . Si le front se propage à vitesse constante, ces trois paramètres (ROS,  $\tau_{\text{Fire}}$ ,  $D_{\text{Fire}}$ ) sont liés par la relation suivante :

$$\tau_{\text{Fire}} = \frac{D_{\text{Fire}}}{\text{ROS}} \quad (1)$$

On note qu'à partir d'une distance de 10m par rapport au brûleur (X = 30m) le feu a atteint un régime pratiquement établi (pour plus de sécurité  $\tau_{\text{Fire}}$  sera évalué à X = 50m). L'évolution de ce paramètre en fonction de la teneur en eau du combustible (FMC) pour deux vitesses de vent (1 et 4 m/s) est reportée sur la Figure 3. Pour des conditions de vent quasi nulles ( $U_{10} = 1$  m/s) la courbe  $\tau_{\text{Fire}} = f(\text{FMC})$  adopte un comportement monotone, associée à une décroissance rapide de la vitesse de propagation (ROS) et de la

profondeur du front d'incendie ( $D_{\text{Fire}}$ ). Cette évolution conduit à une extinction du feu pour une valeur de la teneur en eau du combustible comprise entre 20 et 25%. L'action d'une augmentation de la teneur en eau du combustible sur le comportement du feu est associée à une réduction de la profondeur du front de combustion et par conséquent à une réduction de la quantité de produits de pyrolyse émis par le feu et nécessaire à sa propagation. En résumé on peut associer cette partie de la courbe à un régime de propagation limité par le combustible. Pour une vitesse de vent plus importante ( $U_{10} = 4$  m/s), passé un seuil minimum (atteint pour une valeur de FMC proche de 40%), le temps de résidence du feu se met à augmenter avec la teneur en eau. L'analyse séparée des deux courbes d'évolution  $D_{\text{Fire}}$  et ROS en fonction de la FMC montrent qu'au-delà de 40% de teneur en eau la profondeur du front ( $D_{\text{Fire}}$ ) atteint une valeur plateau de l'ordre 1.5 m (trois fois la longueur d'extinction), alors que la vitesse de propagation continue à décroître de manière significative. C'est cette différence de comportement entre ces deux variables qui permet d'expliquer le fait que le temps de résidence connaît une phase de croissance en fonction de la FMC. Cette phase peut être associée à un régime de propagation limité par l'oxygène, la libération rapide d'une quantité significative d'eau conduit à une dilution suffisante de la fraction massique d'oxygène relevée en amont du front (Figure 4). Les conclusions sur la mise en évidence de ces deux régimes de propagation limité par le combustible et l'oxygène, sont bien supportées par les profils de fraction massique ( $\text{H}_2\text{O}$  et  $\text{O}_2$ ) reportés sur la Figure 4. On note au passage que l'augmentation de la fraction massique d'eau contenue dans la flamme, contribue aussi à une augmentation significative des pertes d'énergie par rayonnement (la température maximum de flamme passe de 1600 K à 1100 K). Par ailleurs l'analyse des résultats concernant le rapport  $\text{ROS} / \text{ROS}_0$  obtenu pour les deux conditions de vent [16], a permis d'expliquer les différents types de lois empiriques d'amortissement linéaires et exponentielles reportés dans la littérature [9, 12]. Les résultats numériques mettent en particulier une décroissance rapide (pas nécessairement exponentielle) de la vitesse de propagation par de vent faible ( $U_{10} = 1$  m/s) et une évolution moins marquée (proche de la linéarité) par vent modéré ( $U_{10} = 4$  m/s).

## 4 Conclusions

L'effet de la teneur en eau du combustible sur la propagation d'un feu de surface a été étudié numériquement à partir d'une formulation multiphasique. Les résultats de simulation ont montré que par vent quasi nul l'action d'une augmentation de la FMC sur la propagation du feu entraînait une réduction de la profondeur du front qui finissait par se collapser et conduisait à une extinction du feu. Pour des conditions de vent plus forte (tout en restant modérées), la profondeur du front pouvait atteindre une valeur seuil, dans ce cas un mécanisme supplémentaire va contribuer à l'extinction du feu : la dilution des gaz frais par de la vapeur d'eau en amont du front.

## References

- [1] S.J. Pyne, P.L. Andrews, R.D. Laven, Introduction to wildland fire, John Wiley & Sons, 2<sup>nd</sup> Ed, 1996.
- [2] Ph. Cheney and A. Sullivan, Grassfires: Fuel, weather and fire behaviour, CSIRO Publishing, 2<sup>nd</sup> Ed., 2008.
- [3] M.J. Baeza, M. De Luis, J. Raventos, A. Escarré, Factors influencing fire behaviour in shrublands of different stand ages and the implications for using prescribed burning to reduce wildfire risk, *J. of Environmental Management*, 65 (2002) 199-208.
- [4] J.G. Goldammer, C. de Ronde Wildland fire management handbook for sub-Saharan Africa, Global Fire Monitoring Center (GFMC), 2004.
- [5] J.S. Silva, F. Rego, P. Fernandes, E. Rigolot, Towards integrated fire management, outcomes of the European project Fire Paradox, European Forest Institute, 2010.
- [6] S.J. Pyne, P.L. Andrews, R.D. Laven, Introduction to wildland fire, 2<sup>nd</sup> Edition, John Wiley & Sons, 1996.
- [7] N.R. Viney, A review of fine fuel moisture modelling, *Int. J. Wildland Fire*, 1 (1991) 215-234.
- [8] N.P. Cheney and J.S. Gould, Fire growth in grassland fuels, *Int. J. Wildland Fire*, 5(4) (1995) 237-247.
- [9] W.R. Catchpole, E.A. Catchpole, B.W. Butler, R.C. Rothermel, G.A. Morris, D.J. Latham, Rate of spread of free-burning fires in woody fuels in a wind tunnel, *Combust. Sci. & Tech.*, 131 (1998) 1-37.
- [10] N.P. Cheney and J.S. Gould, W.R. Catchpole, Prediction of fire spread in grasslands, *Int. J. Wildland Fire*, 8(1) (1998) 1-13.
- [11] D. Morvan, S. Méradji, G. Accary, Physical modelling of fire spread in grasslands, *Fire Safety Journal*, 44 (2009) 50-61.

- [12] H.E. Anderson and R.C. Rothermel, Influence of moisture and wind upon the characteristics of free-burning fires, *Proc. of the Combustion Institute*, 10 (1965) 1009-1019.
- [13] R.A. Wilson Jr, Observations of extinction and marginal burning states in free burning porous fuel beds, *Combust. Sci. & Tech.*, 44 (1985) 179-194.
- [14] D. Weise, X. Zhou, L. Sun, Fire spread in Chaparral: go or no-go?, *Int. J. Wildland Fire*, 14(1) (2005) 99-106.
- [15] D. Morvan and J.L. Dupuy Modelling the propagation of a wildfire through a Mediterranean shrub using a multiphase formulation, *Combustion and Flame* 138 (2004) 199–210.
- [16] D. Morvan Numerical study of the effect of fuel moisture content (FMC) upon the propagation of a surface fire on a flat terrain, *Fire Safety Journal*, 58 (2013) 121-131.

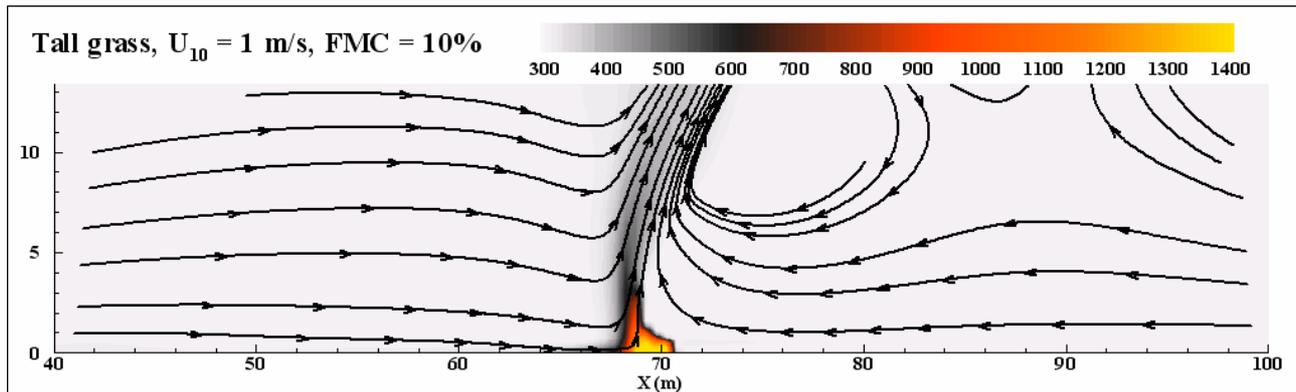


FIG. 1 – Champ de température (gaz) et lignes de courant calculés au cours de la propagation d'un feu à travers une strate de végétation homogène (type prairie) ( $SA/V = 4000 \text{ m}^{-1}$ ,  $FMC = 10\%$ ,  $U_{10} = 1 \text{ m/s}$ ).

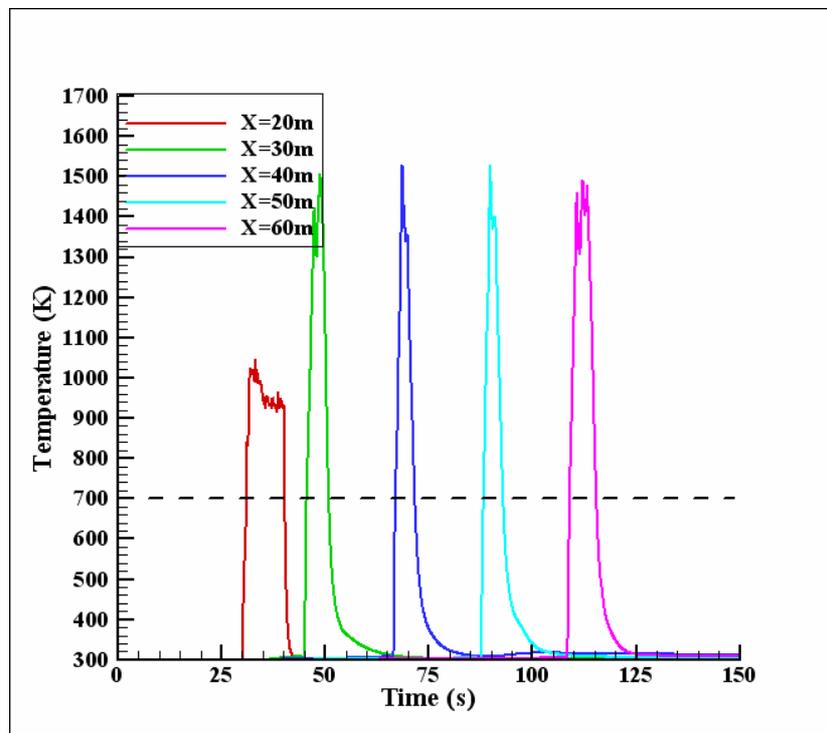


FIG. 2 – Evolution temporelle de la température (gaz) pour différents points situés à 0.25 m au dessus du sol ( $SA/V = 4000 \text{ m}^{-1}$ ,  $FMC = 10\%$ ,  $U_{10} = 1 \text{ m/s}$ ).

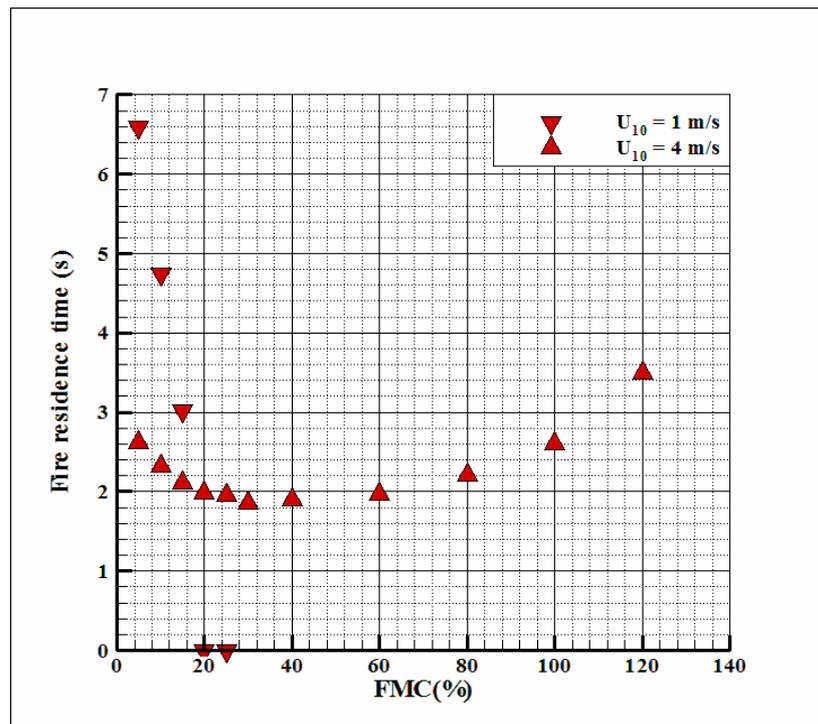


FIG. 3 – Temps de résidence du front d’incendie en fonction de la teneur en eau du combustible (FMC).  
( $SA/V = 4000 \text{ m}^{-1}$ ,  $U_{10} = 1 \text{ m/s}$  et  $4 \text{ m/s}$ ).

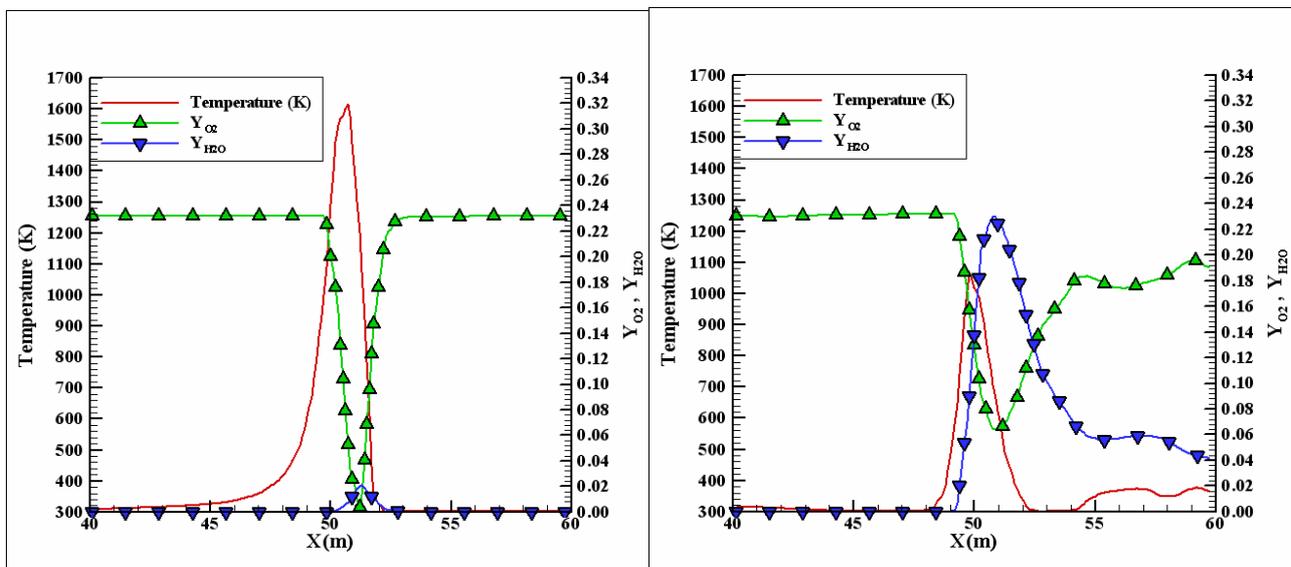


FIG. 4 – Profils de température (gaz), de fraction massique d’oxygène et de vapeur d’eau calculés à  $0.7 \text{ m}$  au dessus du sol pour deux valeurs de la teneur en eau :  $FMC = 5\%$  (à gauche) et  $120\%$  (à droite) ( $U_{10} = 4 \text{ m/s}$ ).

**Remerciements** Cette étude a bénéficié du soutien de l’Agence Nationale de la Recherche (projet IDEA ANR-09-COSI-006).