

## Approximation de la solution de viscosité d'un problème d'Hamilton-Jacobi

Philippe BÉNILAN et Mohamed MALIKI

### Abstract

We consider the Cauchy problem for a parabolic equation  $v_t = \alpha(v)\Delta v + |\nabla v|^2 + F(v)$ , where  $\alpha(v)$  is a "small enough" non negative continuous function; we prove uniform estimate of the modulus of continuity of a classical solution  $v$ , existence of viscosity solutions  $v$ , and convergence, as  $\alpha \rightarrow 0$  in appropriate sense, of these solutions to the viscosity solution of the Cauchy problem for  $v_t = |\nabla v|^2 + F(v)$ .

## 1 Introduction et notations

On considère le problème suivant:

$$\begin{cases} v_t = \alpha(v)\Delta v + |\nabla v|^2 + F(v) & \text{sur } Q = ]0, T[ \times \mathbf{R}^N \\ v(0, x) = v_0(x) & \text{sur } \mathbf{R}^N, \end{cases} \quad (PC)_\alpha$$

où  $F : \mathbf{R}^+ \rightarrow \mathbf{R}$  de classe  $C^1$  avec  $F(0) \geq 0$ ,  $v_0$  bornée uniformément continue sur  $\mathbf{R}^N$  avec  $v_0 \geq 0$  sont des fonctions données et  $\alpha : \mathbf{R}^+ \rightarrow \mathbf{R}^+$  de classe  $C^1$  une fonction paramètre que l'on fera varier dans une classe de fonctions précisée ci-dessous.

Lorsque  $\alpha(v) \equiv 0$ , le problème  $(PC)_\alpha$  se réduit au problème hyperbolique d'Hamilton-Jacobi:

$$\begin{cases} v_t = |\nabla v|^2 + F(v) & \text{sur } Q \\ v(0, x) = v_0(x) & \text{sur } \mathbf{R}^N. \end{cases} \quad (PC)_0$$

---

1991 Mathematics Subject Classification: 35K65, 35B25, 35B65.

Servicio Publicaciones Univ. Complutense. Madrid, 1996.

Dans ce travail nous donnons une estimation du module de continuité d'une solution classique du problème  $(PC)_\alpha$ , uniforme en  $\alpha$  variant dans la classe de fonctions considérée. Cette estimation permet d'une part de montrer l'existence d'une famille équicontinue de solutions de viscosité  $(v_\alpha)_\alpha$  de  $(PC)_\alpha$ , et d'autre part d'obtenir le problème  $(PC)_0$  comme limite des problèmes  $(PC)_\alpha$ , quand la fonction  $\alpha$  tend vers 0 adéquatement. Le problème a été étudié dans le cas particulier,  $F(v) \equiv 0$  et  $\alpha(v) = (m-1)v$ , où  $m$  est un paramètre réel,  $m \geq 1$  dans [AV] (pour  $N = 1$ ; cf. aussi [M] par une technique de compacité par compensation), et dans [LSV] (pour  $N \geq 2$ ).

Dans ce cas particulier avec  $m \geq 1$ ,  $(PC)_\alpha$  se réduit à l'équation des milieux poreux  $u_t = \Delta u^m$  par la transformation  $v = \frac{m}{m-1}u^{m-1}$ . Dans le cas général que nous considérons,  $(PC)_\alpha$  peut être relié au problème du type milieux poreux

$$\begin{cases} u_t = \Delta \varphi(u) + G(u) & \text{sur } Q \\ u(0, x) = u_0(x) & \text{sur } \mathbf{R}^N, \end{cases} \quad (MP)$$

où  $\varphi, u, G$  sont définis par  $\frac{dv}{du} = \frac{\varphi'(u)}{u}$ ,  $\varphi'(u) = \alpha(v)$ ,  $G(u) = \frac{uF(v)}{\varphi'(u)}$ , mais plusieurs difficultés apparaissent.

Une première difficulté provient de la généralité des hypothèses sur  $F(v)$  : dans le changement d'inconnue  $v = \psi(u)$ , donnant la relation entre  $(PC)_\alpha$  et  $(MP)$ , en effet même dans le cas  $\alpha(v) = (m-1)v$ , la fonction  $G(u)$  intervenant dans  $(MP)$  ne sera pas en général localement lipschitzienne: on ne peut donc pas utiliser la perturbation de l'équation des milieux poreux pour définir la solution de  $(PC)_\alpha$ . Or si  $(PC)_0$  et  $(MP)$ , lorsque  $F(v) \equiv 0$  et  $G(u) \equiv 0$  respectivement, définissent des semi-groupes de contraction dans  $C_{ucb}(\mathbf{R}^N)$  et  $L^1(\mathbf{R}^N)$ , le problème  $(PC)_\alpha$  lorsque  $\alpha(v)$  est non identiquement nulle, ne semble pas pouvoir être abordé par des techniques classiques des semi-groupes non-linéaires.

La deuxième difficulté provient de la généralité que nous considérons sur les fonctions  $\alpha(v)$  : même dans le cas où  $F(v) \equiv 0$ , il est nécessaire de mettre en évidence de nouvelles estimations pour obtenir la continuité d'une solution de  $(PC)_\alpha$ ; notons que nous obtiendrons ces estimations pour des fonctions  $\alpha(v)$  "suffisamment petites".

Afin de définir la classe de fonctions  $\alpha$  que nous considérons, introduisons d'abord les notations que nous utiliserons par la suite : on suppose que  $T \in ]0, \infty[$  est tel que la solution maximale de l'équation

différentielle :  $M'(t) = F(M(t))$  sur  $]0, T[$ ,  $M(0) = \sup v_0(x)$ , soit définie et bornée sur  $[0, T[$ . On pose

$$M_0 = \sup_{t \in [0, T[} M(t), \quad M_1 = \max_{k \in [0, M_0]} F'(k).$$

Nous considérons la classe  $\mathcal{A}$  des fonctions  $\alpha \in C^1(\mathbf{R}^+, \mathbf{R}^+)$  vérifiant

$$m_0(\alpha) := \min_{k \in [0, M_0]} (\alpha'(k) + 1) > 0 \tag{1}$$

De plus dans le cas  $N \geq 2$ , on suppose que

$$\begin{cases} \alpha(0) = 0 \\ \varepsilon(\alpha) := \sup_{k \in [0, M_0], \alpha(k) > 0} \frac{\alpha'^2(k) \cdot k}{\alpha(k)} < \frac{m_0(\alpha)}{1 + \sqrt{2(N-1)}}. \end{cases} \tag{2}$$

Il est clair que  $\alpha(v) \equiv 0$  vérifie ces conditions. On dira qu'une suite  $(\alpha_n)$  tend vers 0 si les conditions suivantes sont vérifiées

$$\begin{cases} m_0(\alpha_n) \geq m_0 > 0 \text{ pour tout } n \\ \alpha_n \longrightarrow 0 \text{ dans } C([0, M_0]) \text{ et pour } N \geq 2, \varepsilon(\alpha_n) \longrightarrow 0. \end{cases} \tag{3}$$

Notons que dans le cas où  $\alpha_m(v) = (m-1)v, m \geq 1$  on a  $\alpha_m(0) = 0, m_0(\alpha_m) = m$ , et  $\varepsilon(\alpha_m) = m-1$ ; la condition (2) s'écrit  $m < 1 + \frac{1}{\sqrt{2(N-1)}}$ ; on a  $(\alpha_n)$  tend vers 0 quand  $m$  tend vers 1.

Dans la deuxième section, nous prouvons une estimation uniforme du gradient d'une solution classique de  $(PC)_\alpha$ , et l'équicontinuité d'une famille de ces solutions.

Dans la troisième section nous montrons que cette estimation est suffisante pour obtenir l'existence d'une famille équicontinue de solutions de viscosité  $(v_\alpha)_\alpha$  de  $(PC)_\alpha$  pour  $\alpha \in \mathcal{A}$ , et d'établir sa convergence vers l'unique solution de viscosité de  $(PC)_0$ , lorsque la fonction  $\alpha$  tend vers 0.

## 2 Estimation du gradient dans le cas régulier

Dans ce paragraphe on se place dans le cas régulier. On suppose que  $(\alpha, v_0, F)$  sont de classe  $C^\infty, \alpha > 0$  sur  $]0, M_0]$ , et  $\inf v_0(x) > 0$ .

On note  $\eta_0 = \inf_{t \in [0, T]} \eta(t)$  où  $\eta$  est la solution de  $\eta'(t) = F(\eta(t))$ ,  $\eta(0) = \inf v_0(x)$ , qui est définie et strictement positive sur  $[0, T]$ . Utilisant le principe de comparaison et les résultats classiques sur les équations uniformément paraboliques (cf. [LSU]), il existe un unique  $v : \bar{Q} \rightarrow [\eta_0, M_0]$  de classe  $C^\infty$  solution classique de  $(PC)_\alpha$ .

On suppose évidemment que  $\alpha$  vérifie les conditions (1), (2); de façon plus précise on suppose

$$\begin{cases} \text{dans le cas } N = 1, m_0(\alpha) \geq m_0, \\ \text{dans le cas } N \geq 2, m_0(\alpha) - \left(\sqrt{2(N-1)} + 1\right) \varepsilon(\alpha) \geq m_0, \end{cases} \quad (4)$$

où  $m_0 > 0$  est fixé.

**Théorème 1.** *On pose*

$$l = \sqrt{\frac{N-1}{2}}. \quad (5)$$

*Il existe une constante  $C = C(m_0, M_0, M_1, F(0))$  telle que*

$$|\nabla v|^2 \leq \frac{C}{tv^l} \quad \text{sur } Q \quad (6)$$

*Si de plus,  $v_0$  est lipschitzienne sur  $\mathbf{R}^N$ , alors il existe une constante  $C' = C'(m_0, M_0, M_1, F(0), \|\nabla v_0\|_\infty)$  telle que*

$$|\nabla v|^2 \leq \frac{C'}{v^l} \quad \text{sur } \bar{Q} \quad (7)$$

Ce résultat est une extension de celui dans [B] obtenu pour  $\alpha(v) = (m-1)v$ ,  $F(v) \equiv 0$ . Pour la preuve nous suivons la même démarche; montrons d'abord le lemme suivant:

**Lemme 2.** *Soit  $H : [\eta_0, M_0] \times \mathbf{R}^+ \rightarrow \mathbf{R}^+$ . On suppose que  $H_r(k, r) = \frac{\partial H}{\partial r}(k, r) > 0$  sur  $[\eta_0, M_0] \times \mathbf{R}^+$  et pour tout  $k \in [\eta_0, M_0]$ ,  $H(k, \cdot)$  est un homéomorphisme de  $\mathbf{R}^+$  dans  $\mathbf{R}^+$ ; on note  $A(k, \cdot)$  l'homéomorphisme réciproque. Posons  $h(t, x) = H(v(t, x), |\nabla v(t, x)|^2)$ .*

1) *Soit  $M$  une constante positive telle que:*

$$\begin{cases} M + t^2 \left[ H_k F + H_r \frac{(N-1)}{2} \frac{\alpha^2}{\alpha} A^2\left(v, \frac{M}{t}\right) - \left( (\alpha' + 1) H_k \right. \right. \\ \left. \left. - 2H_r F' + \alpha \left( H_{kk} - \left( \frac{H_r^2}{H_r} \right)_r \right) \right) A\left(v, \frac{M}{t}\right) \right] \leq 0 \quad \text{sur } Q \end{cases} \quad (8)$$

alors

$$h(t, x) \leq \frac{M}{t} \quad \text{sur } Q.$$

2) Soit  $M'$  une constante positive telle que:

$$\left\{ \begin{array}{l} H_k F + H_r \frac{(N-1)}{2} \frac{\alpha^2}{\alpha} A^2(v, M') - [(\alpha' + 1)H_k - 2H_r F' \\ \quad + \alpha \left( H_{kk} - \left( \frac{H_k^2}{H_r} \right)_r \right)] A(v, M') \leq 0 \text{ sur } Q. \\ \text{et } h(0, x) \leq M' \quad \text{sur } \mathbf{R}^N \end{array} \right. \quad (9)$$

alors

$$h(t, x) \leq M' \quad \text{sur } \bar{Q}.$$

Dans (8) (resp. (9)), les fonctions  $\alpha, F$  et leurs dérivées sont prises en  $v$ , et les dérivées considérées de  $H$  sont prises en  $v, A(v, \frac{M}{t})$  (resp.  $A(v, M')$ ), la fonction  $v$  étant prise en  $(t, x)$ .

**Preuve du Lemme 2.**

On a

$$\left\{ \begin{array}{l} h_t = H_k(\alpha \Delta v + |\nabla v|^2 + F) + 2H_r(\alpha' |\nabla v|^2 \Delta v + \alpha \nabla v \cdot \nabla(\Delta v) \\ \quad + \nabla v \cdot \nabla(|\nabla v|^2) + F' |\nabla v|^2). \end{array} \right. \quad (10)$$

D'un autre côté

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla h = H_k \nabla v + H_r \nabla(|\nabla v|^2), \\ \Delta h = H_k \Delta v + 2H_r(\alpha \nabla v \cdot \nabla(\Delta v) + \sum_{i,j} v_{x_i x_j}^2) + H_{kk} |\nabla|^2 \\ \quad + 2H_{kr} \nabla v \cdot \nabla(|\nabla v|^2) + H_{rr} |\nabla(|\nabla v|^2)|^2, \end{array} \right. \quad (11)$$

d'où en remplaçant dans (10),  $\nabla(|\nabla v|^2)$  et  $H_k \Delta v + 2H_r \alpha \nabla v \cdot \nabla(\Delta v)$ , tirés de (11), on obtient

$$\left\{ \begin{array}{l} h_t = \alpha \Delta h + 2 \nabla h \nabla v \left[ 1 - \alpha \left( \frac{H_k}{H_r} \right)_r \right] - \frac{\alpha H_{rr}}{H_r^2} |\nabla h|^2 + H_v F \\ \quad + 2H_r(\alpha' \Delta v |\nabla v|^2 - \alpha \sum_{i,j} v_{x_i x_j}^2) - |\nabla v|^2 [H_k - 2H_r F' \\ \quad + \alpha \left( H_{kk} - \left( \frac{H_k^2}{H_r} \right)_r \right)]. \end{array} \right. \quad (12)$$

où les dérivées de  $H$  sont prises en  $(v, |\nabla v|^2)$ . On a

$$\begin{aligned} S &:= \frac{\alpha'}{\alpha} \left( |\nabla v|^2 \Delta v - \sum_{i,j} v_{x_i} v_{x_j} v_{x_i x_j} \right) - \sum_{i,j} v_{x_i x_j}^2 \\ &= \left[ \sum_i \left( \frac{\alpha'}{\alpha} (|\nabla v|^2 - v_{x_i}^2) v_{x_i x_i} - v_{x_i x_i}^2 \right) \right] \\ &\quad - \left[ \sum_{i \neq j} \left( \frac{\alpha'}{\alpha} v_{x_i} v_{x_j} v_{x_i x_j} + v_{x_i x_j}^2 \right) \right] \\ &\leq \frac{\alpha'^2}{4\alpha^2} \sum_i (|\nabla v|^2 - v_{x_i}^2)^2 + \frac{\alpha'^2}{4\alpha^2} \sum_{i \neq j} v_{x_i}^2 v_{x_j}^2, \end{aligned}$$

où on a majoré chaque crochet par l'inégalité de Young ( $\pm 2ab - b^2 \leq a^2$ ).  
Donc

$$S \leq \frac{N-1}{4} \frac{\alpha'^2}{\alpha^2} |\nabla v|^4,$$

d'où

$$\begin{aligned} 2H_r \left( \alpha' |\nabla v|^2 \Delta v - \alpha \sum_{i,j} v_{x_i x_j}^2 \right) &= 2H_r (\alpha S + \alpha' \sum_{i,j} v_{x_i} v_{x_j} v_{x_i x_j}) \\ &\leq H_r \frac{(N-1)\alpha'^2}{2\alpha} |\nabla v|^4 - \alpha' \nabla h \nabla v - \alpha' H_v |\nabla v|^2 \end{aligned}$$

En remplaçant dans (12), et en utilisant  $|\nabla v|^2 = A(v, h)$  on obtient l'inégalité

$$\left\{ \begin{aligned} \mathcal{L}(h) &= h_t - \alpha \Delta h + 2\nabla h \cdot \nabla v \left[ 1 - \frac{\alpha'}{2} - \alpha \left( \frac{H_k}{H_r} \right)_r \right] - H_k F \\ &\quad + \frac{\alpha H_{rr}}{H_r^2} |\nabla h|^2 - H_r \frac{(N-1)\alpha'^2}{2\alpha} A^2(v, h) \\ &\quad + \left[ (\alpha' + 1)H_k - 2H_r F' + \alpha \left( H_{kk} - \left( \frac{H_k^2}{H_r} \right)_r \right) \right] A(v, h) \leq 0, \end{aligned} \right. \quad (13)$$

les dérivées considérées de  $H$  étant prises en  $(v, A(v, h))$ .

Étant donné  $M > 0$  la fonction  $\xi(t, x) = \frac{M}{t}$  vérifie  $\mathcal{L}(\xi) \geq 0$  si et seulement si l'inégalité (8) est vérifiée; puisque  $h(0, x) \leq \lim_{t \downarrow 0} \xi(t)$ , par principe de comparaison on a  $h(t, x) \leq \frac{M}{t}$ .

De même, en prenant  $\xi(t, x) = M'$ ,  $\mathcal{L}(\xi) \geq 0$  et  $h(0, x) \leq \xi(0)$  si et seulement si l'inégalité (9) est vérifiée; par principe de comparaison on a  $h(t, x) \leq M'$  sur  $\bar{Q}$ .

■

**Preuve du Théoreme 1.**

Considérons d'abord le cas  $N = 1$ . On utilise le Lemme 2 avec  $H(k, r) = \frac{r}{2M_0 - k}$ . L'inégalité (8) s'écrit alors

$$1 + t\left(\frac{F}{2M_0 - v} + 2F'\right) \leq M(\alpha' + 1).$$

En utilisant  $F(v) \leq F(0) + M_0M_1$ , (8) est donc vérifiée par

$$M = \frac{(1 + T(\frac{F(0)}{M_0} + 3M_1))}{m_0}.$$

Le Lemme 2 donne:

$$\frac{v_x^2}{(2M_0 - v)} = H(v, v_x^2) \leq \frac{M}{t} \quad \text{sur } Q$$

d'où

$$v_x^2(t, x) \leq \frac{C}{t} \quad \text{sur } Q, \quad \text{avec } C = 2M_0M.$$

De même (9) s'écrit

$$\frac{F}{2M_0 - v} + 2F' \leq M'(\alpha' + 1), \quad \frac{v_0^2}{2M_0 - v_0} \leq M'.$$

Appliquant le Lemme 2 comme ci-dessus, on a donc

$$v_x^2(t, x) \leq 2 \max(\|v'_0\|_{\infty}^2, \frac{F(0) + 3M_0M_1}{m_0}) \quad \text{sur } \bar{Q}.$$

Dans le cas  $N \geq 2$ , on choisit la fonction  $H(k, r) = k^l r$ . Alors (8) s'écrit

$$1 + t\left(\frac{lF}{v} + 2F'\right) \leq \frac{lM}{v^{l+1}} \left[ (\alpha' + 1) - \frac{(l+1)\alpha}{v} - \frac{N-1}{2t} \frac{\alpha'^2 v}{\alpha} \right].$$

Par définition  $\frac{\alpha'^2 v}{\alpha} \leq \varepsilon(\alpha)$  et donc aussi, en intégrant en  $v$ ,  $\frac{\alpha}{v} \leq \varepsilon(\alpha)$ ; on a alors

$$\begin{aligned} & \left[ (\alpha' + 1) - \frac{(l+1)\alpha}{v} - \frac{N-1}{2l} \frac{\alpha'^2 v}{\alpha} \right] \geq \\ & \geq m_0(\alpha) - (\sqrt{2(N-1)} + 1)\varepsilon(\alpha) \geq m_0. \end{aligned}$$

L'inégalité (8) est donc vérifiée par

$$M = \frac{M_0^l (M_0 + T(lF(0) + (l+2M_0)M_0M_1))}{lm_0}$$

ce qui prouve (6) avec  $C = M$ . De la même manière, on montre (7) avec

$$C' = M_0^l \max(\|\nabla v_0\|_\infty^2, \frac{lF(0) + (l+2M_0)M_0M_1}{lm_0}).$$

■

Comme application de cette estimation, le résultat suivant donne l'équi-continuité de  $(v_\alpha)_\alpha$  pour vérifiant (4) et

$$\mu(\alpha) := \max_{k \in [0, M_0]} \alpha(k) \leq \mu_0 \quad \text{où } \mu_0 \text{ est fixé.}$$

**Théorème 3.** *On pose*

$$\gamma = 1/(l+2).$$

*Étant donné  $0 < \tau < T$  (resp.  $\tau = 0$ ), il existe une constante  $C = C(\tau, m_0, \mu_0, M_0, M_1, F(0))$  (resp.  $C = C(m_0, \mu_0, M_0, M_1, F(0), \|\nabla v_0\|_\infty)$ ) telle que*

$$|v(t_1, x) - v(t_0, x_0)| \leq C(|x - x_0|^{2\gamma} + |t - t_0|^\gamma) \quad (14)$$

*pour tout  $\tau \leq t_0 < t_1 \leq T$ ,  $x_0, x \in \mathbf{R}^N$ .*

On établira notre résultat en adaptant ceux de [Kr], [G], reliant le module de continuité en  $t$ , de la solution classique d'une équation parabolique linéaire, à son module de continuité en  $x$ . Ces derniers résultats ne peuvent être directement appliqués dans notre cas: dans l'équation de  $(PC)_\alpha$  intervient  $|\nabla v|^2$  et au moins dans le cas  $N \geq 2$



l'on n'a pas d'estimation uniforme du gradient; également nous cherchons une estimation indépendante de  $\alpha$  vérifiant (4), ce que ne nous fournit pas, même dans le cas  $N = 1$ , les résultats de [Kr] ou [G]. Notre adaptation consiste alors à faire des choix différents des fonctions et des opérateurs utilisés dans la preuve de [G] en exploitant le terme  $|\nabla v|^2$ , et à s'assurer que le module de continuité trouvé et les constantes intervenant sont indépendantes de la fonction paramètre  $\alpha$ .

**Preuve.**

D'après le Théorème 1, il existe  $C_0 = C_0(\tau, m_0, M_0, M_1, F(0))$  (resp.  $C_0(m_0, M_0, M_1, F(0), \|\nabla v_0\|_\infty)$ ) tel que

$$|v(t, x) - v(t, x_0)| \leq C_0 |x - x_0|^{2\gamma} \tag{15}$$

pour tout  $\tau \leq t \leq T, x_0, x \in \mathbf{R}^N$ . Il suffit donc de montrer qu'étant donné  $x_0 \in \mathbf{R}^N, \tau \leq t_0 \leq t_1 \leq T$ , on a

$$|v(t_1, x_0) - v(t_0, x_0)| \leq C_1 |t_1 - t_0|^\gamma \tag{16}$$

où  $C_1$  ne dépend pas de  $x_0, t_0, t_1$ .

Soient  $\rho > 0, C_2 > 0$  des constantes qui seront choisies par la suite.

Posons

$$\begin{aligned} R &= ]t_0, t_1[ \times B(x_0, \rho), \\ s &= \sup_{t_0 \leq t \leq t_1} |v(t, x_0) - v(t_0, x_0)|, \\ v_\pm(t, x) &= C_2(1 + 2s\rho^{-2})(t - t_0) + s\rho^{-2} \\ &\quad |x - x_0|^2 + C_0\rho^{2\gamma} \pm (v(t, x) - v(t_0, x_0)). \end{aligned}$$

On a

$$v_{\pm,t} = \alpha(v)\Delta v_\pm \pm \nabla v_\pm (\nabla v_\pm - 4s\rho^{-2}(x - x_0)) + f_\pm,$$

avec

$$f_\pm = C_2(1 + 2s\rho^{-2}) \pm 4s^2\rho^{-4}(x - x_0)^2 \pm F(v) - 2\alpha(v)N s\rho^{-2}.$$

D'autre part

$$\begin{aligned} v_\pm(t, x) &\geq C_0\rho^{2\gamma} \pm (v(t_0, x) - v(t_0, x_0)) \geq 0 \quad \forall x \in B(x_0, \rho). \\ v_\pm(t, x) &\geq s + C_0\rho^{2\gamma} \pm (v(t, x) - v(t_0, x_0)) \geq 0 \quad \forall (t, x) \in ]t_0, t_1[ \times \partial B(x_0, \rho). \\ f_\pm &\geq C_2 - |F(v)| + 2s\rho^{-2}(C_2 - 2s - \mu_0 N) \text{ sur } R. \end{aligned}$$

Choisissant

$$C_2 > \max(F(o) + M_0M_1, 4M_0 + N\mu_0),$$

on a  $f_{\pm} \geq 0$  sur  $R$ , d'où par principe du maximum  $v_{\pm} \geq 0$  sur  $R$ . En particulier

$$\pm(v(t, x_0) - v(t_0, x_0)) \leq C_2(1 + 2s\rho^{-2})(t - t_0) + C_0\rho^{2\gamma}.$$

d'où

$$s \leq C_2(1 + 2s\rho^{-2})(t_1 - t_0) + C_0\rho^{2\gamma}.$$

Choisissant

$$\rho = 2(C_2(t_1 - t_0))^{1/2}$$

on obtient

$$s \leq 2(C_2(t_1 - t_0) + 2^{2\gamma}C_0C_2^\gamma(t_1 - t_0)^\gamma)$$

d'où (16) avec  $C_1 = 2(C_2T^{1-\gamma} + 2^{2\gamma}C_0C_2^\gamma)$ .

■

### 3 Solutions de $(PC)_\alpha$

Dans cette section on donne un résultat d'existence, d'équicontinuité d'une famille  $(v^\alpha)_\alpha$  de solution de viscosité  $(PC)_\alpha$  et sa convergence vers l'unique solution de viscosité du problème  $(PC)_0$  quand la fonction paramètre  $\alpha$  tend vers 0.

Rappelons qu'une solution de viscosité de  $(PC)_\alpha$  (cf. [CIL], [Ba]) est une fonction  $v \in C(\bar{Q})$  avec  $v(0, x) = v_0(x)$  sur  $\mathbf{R}^N$ , vérifiant

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Pour toute fonction } \varphi \text{ de classe } C^2(Q) \text{ on a :} \\ \frac{\partial \varphi}{\partial t}(t, x) - \alpha(v(t, x))\Delta\varphi(t, x) - |\nabla\varphi(t, x)|^2 - F(v(t, x)) \leq 0 \\ \text{( resp. } \geq 0 \text{) en tout point } (t, x) \in Q \text{ où } (v - \varphi) \text{ atteint} \\ \text{un maximum (resp. minimum) local.} \end{array} \right. \quad (17)$$

Lorsque  $\alpha \equiv 0$ , il existe une unique solution de viscosité  $v^0$  de  $(PC)_0$  (cf. [S]). Dans le cas  $\alpha \not\equiv 0$ , nous ignorons s'il y a ou non unicité d'une solution de viscosité de  $(PC)_\alpha$ , mais nous prouvons le résultat suivant:

**Théorème 4.** *Il existe une famille  $(v^\alpha)_{\alpha \in A}$  de fonctions continues sur  $\bar{Q}$  telle que*

- i)  $(v^\alpha)$  est une solution de viscosité de  $(PC)_\alpha$  pour tout  $\alpha \in A$
- ii)  $(v^\alpha) \rightarrow v^0$  dans  $C(\bar{Q})$  quand  $\alpha \rightarrow 0$  au sens précisé dans la section 1.

**Preuve.**

On considère d'abord le cas  $N = 1$ . On approxime  $v_0, F, \alpha$  de la manière suivante. On se donne  $\rho \in \mathcal{D}(\mathbf{R}), \rho(x) = \rho(-x), \text{supp} \rho \subset [-1, +1], \int \rho(x) dx = 1$ . On pose

$$v_{0,n} = \frac{1}{n} + \frac{n-1}{n}(v_0 * \rho_n), \quad \text{où } \rho_n(x) = n\rho(nx), \quad (18)$$

on évidemment  $v_{0,n} \in C^\infty(\mathbf{R})$ ,

$$\begin{cases} \frac{1}{n} \leq v_{0,n} \leq \sup v_0, v_{0,n} \rightarrow v_0 \text{ dans } C(\mathbf{R}), \\ \text{et si } \nabla v_0 \in L^\infty(\mathbf{R}), \quad \|\nabla v_0\|_\infty \leq \|\nabla v_{0,n}\|_\infty. \end{cases} \quad (19)$$

D'autre part on pose

$$F_n(k) = F(0) + \int_0^k G_n(l) dl - \|G_n - G\|_\infty k, \quad (20)$$

où  $G_n(k) = \int_0^\infty G(\lambda_n k + \frac{l}{n}) \rho(l+1) dl$ , avec

$$G(k) = \begin{cases} F'(k) & \text{si } 0 \leq k \leq M_0 \\ F'(M_0) & \text{si } k \geq M_0, \end{cases}$$

et

$$\lambda_n = 1 - \frac{2}{nM_0}.$$

On a  $F_n \in C^\infty(\mathbf{R}), F_n(0) = F(0), F_n \leq F$ , de telle sorte que la solution  $M_n$  de  $M_n'(t) = F_n(M_n(t)), M_n(0) = \sup v_{0,n}$  vérifie  $M_n(t) \leq M_0$  pour tout  $t \in [0, T]$ . On a aussi  $F_n'(k) \leq G_n(k) \leq M_1$  pour  $k \in [0, M_0]$  et  $F_n \rightarrow F$  dans  $C([0, M_0])$ . Enfin on pose

$$\alpha_n(k) = (1 - \lambda_n)k + \int_0^\infty \alpha(\lambda_n k + \frac{l}{n}) \rho(l+1) dl,$$

on a  $\alpha_n \in C^\infty([0, M_0])$ ,  $\alpha'_n(k) + 1 \geq m_0(\alpha)$   $\alpha_n > 0$  sur  $]0, M_0]$  et  $\alpha_n \rightarrow \alpha$  dans  $C([0, M_0])$ .

On est donc dans les hypothèses de la section 2, et il existe une unique solution  $v_n \in C^\infty(\bar{Q})$ , des problèmes de Cauchy correspondants à  $(v_{0,n}, F_n, \alpha_n)$ ; de plus d'après le Théorème 3,  $(v_n)_{n \in \mathbb{N}}$  est relativement compact dans  $C(Q)$ . Puisque  $v_n$  est solution de viscosité des problèmes associés à  $(v_{0,n}, F_n, \alpha_n)$ , il est clair par passage à la limite que  $v^\alpha$  vérifie (17) (cf. [Ba]).

Montrons que  $v^\alpha \in C(\bar{Q})$  avec  $v^\alpha(0, x) = v_0(x)$  par une méthode classique de barrières. Considérons  $\underline{v}_0, \bar{v}_0 \in W^{1,\infty}(\mathbf{R})$  tel que  $\underline{v}_0 \leq v_0 \leq \bar{v}_0$ ,  $\underline{v}_{0,n}, \bar{v}_{0,n}$  les approximations correspondantes définies par (18),  $\underline{v}_n, \bar{v}_n$  les solutions correspondant à  $(\underline{v}_{0,n}, F_n \alpha_n)$ ,  $(\bar{v}_{0,n}, F_n \alpha_n)$ , respectivement.

Par principe de comparaison on a  $\underline{v}_n \leq v_n \leq \bar{v}_n$ ; de plus d'après le Théorème 3,  $(\underline{v}_n, \bar{v}_n)_{n \in \mathbb{N}}$  est relativement compact de  $C(\bar{Q})$ ; il existe donc une suite extraite  $(n_k)$  telle que  $(\underline{v}_{n_k}, v_{n_k}, \bar{v}_{n_k}) \rightarrow (\underline{v}, v^\alpha, \bar{v})$  dans  $C(\bar{Q}) \times C(Q) \times C(\bar{Q})$ ; on a  $\underline{v} \leq v^\alpha \leq \bar{v}$  sur  $Q$  et donc

$$\underline{v}_0(x) \leq \liminf_{(t,x) \rightarrow (0,x)} v^\alpha(t, x) \leq \limsup_{(t,x) \rightarrow (0,x)} v^\alpha(t, x) \leq \bar{v}_0(x).$$

Puisque pour tout  $R, \delta > 0$ , il existe  $\underline{v}_0, \bar{v}_0 \in W^{1,\infty}(\mathbf{R})$  tel que  $\underline{v}_0 \leq v_0 \leq \bar{v}_0$  sur  $\mathbf{R}$  et  $\underline{v}_0 - \bar{v}_0 \leq \delta$  sur  $[-R, +R]$ , on a bien le résultat énoncé. En fait ce raisonnement, montre que  $v^\alpha$  est valeur d'adhérence de  $(v_n)$  dans  $C(\bar{Q})$ .

Enfin considérons une suite  $(\alpha^j)_{j \in \mathbb{N}}$  de  $\mathcal{A}$  telque  $\alpha^j \rightarrow 0$  dans  $C([0, M_0])$  et  $m_0(\alpha^j) \geq m_0 > 0$ . Montrons que  $v^{\alpha^j} \rightarrow v^0 \in C(\bar{Q})$ . Pour tout  $j \in \mathbb{N}$ , il existe d'après le résultat précédent,  $n_j \geq j$  tel que  $|v^{\alpha^j} - v^{\alpha_{n_j}^j}| < \frac{1}{j}$  sur  $[0, T] \times [-j, +j]$ .

Puisque  $\alpha_{n_j}^j \rightarrow 0$  dans  $C([0, M_0])$  et  $m_0(\alpha_{n_j}^j) \geq m_0$ ,  $(v^{\alpha_{n_j}^j})_{j \in \mathbb{N}}$  est relativement compact dans  $C(\bar{Q})$ ; en raisonnant comme ci-dessus, tout point d'accumulation est valeur d'adhérence dans  $C(\bar{Q})$  et solution de viscosité de  $(PC)_0$ ; c'est à dire  $v^{\alpha_{n_j}^j} \rightarrow v^0$  dans  $C(\bar{Q})$ . Donc  $v^{\alpha^j} \rightarrow v^0$  dans  $C(\bar{Q})$ .

La preuve dans le cas  $N \geq 2$  est identique; le seul problème est l'approximation de  $\alpha \in \mathcal{A}$  par des fonctions  $\alpha_n \in C^2(\mathbf{R})$  vérifiant

$$m_0(\alpha_n) - \left( \sqrt{2(N-1)} + 1 \right) \varepsilon(\alpha_n) \geq m_0 > 0.$$

Pour cela notons pour  $\delta, \eta > 0$

$$\alpha_\delta(k) = \alpha(k) + \delta k, \quad \psi_\delta(k) = \frac{k^{1/2} \alpha'_\delta(k)}{\sqrt{\alpha_\delta(k)}} = 2k^{1/2} \frac{d}{dk} \sqrt{\alpha_\delta(k)}.$$

$$\begin{cases} \psi_{\delta,\eta} = \psi_\delta * \rho_\eta + \gamma_\delta(\eta) \\ \text{avec } \gamma_\delta(\eta) = \|\psi_\delta * \rho_\eta - \psi_\delta\|_{L^\infty([0, M_0])} \text{ et } \rho_\eta(x) = \frac{1}{\eta^N} \prod_{i=1}^N \rho\left(\frac{x_i}{\eta}\right) \end{cases}$$

$$\alpha_{\delta,\eta}(k) = \left( \int_0^k \frac{\psi_{\delta,\eta}(r)}{2r^{1/2}} dr \right)^2 = k \left( \int_0^1 \psi_{\delta,\eta}(kr^2) dr \right)^2.$$

Puisque  $\psi_{\delta,\eta} \geq \psi_\delta$  sur  $[0, M_0]$ , on a  $\alpha_{\delta,\eta} \geq \alpha_\delta > 0$  sur  $]0, M_0]$ . Puisque  $\psi_{\delta,\eta} \in C^\infty(\mathbb{R}^+)$ , on a aussi  $\alpha_{\delta,\eta} \in C^\infty(\mathbb{R}^+)$ . La fonction  $\psi_\delta$  est continue sur  $\mathbb{R}^+$  avec  $\psi_\delta(0) = (\alpha'(0) + \delta)^{1/2}$  et donc

$$\psi_{\delta,\eta} \longrightarrow \psi_\delta \text{ dans } C(\mathbb{R}^+) \text{ quand } \eta \longrightarrow 0 \text{ pour tout } \delta > 0;$$

ainsi

$$\alpha_{\delta,\eta} \longrightarrow \alpha_\delta \text{ dans } C(\mathbb{R}^+) \text{ quand } \eta \longrightarrow 0 \text{ pour tout } \delta > 0.$$

On a

$$\alpha'_{\delta,\eta} = \frac{\psi_{\delta,\eta} \sqrt{\alpha_{\delta,\eta}}}{k^{1/2}} \geq \frac{\psi_\delta \sqrt{\alpha_\delta}}{k^{1/2}} = \alpha'_\delta \geq \alpha'$$

et donc  $m_0(\alpha'_{\delta,\eta}) \geq m_0(\alpha')$ . D'un autre côté

$$\frac{\alpha_{\delta,\eta}^2(k)k}{\alpha_{\delta,\eta}(k)} = \psi_{\delta,\eta}^2 \leq (\psi_\delta + 2\gamma_\delta(\eta))^2.$$

d'où

$$\varepsilon(\alpha_{\delta,\eta}) \leq \left( \varepsilon(\alpha)^{1/2} + \delta^{1/2} + \gamma_\delta(\eta) \right)^2.$$

Il existe donc  $\alpha_n$  dans  $C^\infty(\mathbb{R}^+) \cap \mathcal{A}$  vérifiant (4) telle que  $\alpha_n \longrightarrow \alpha$  dans  $C(\mathbb{R}^+)$ .

■

## Bibliographie

- [AV] D. G. Aronson, J. L. Vázquez, *The porous medium equation as a finite-speed approximation to a Hamilton Jacobi equation*. Ann. Inst. Henri Poincaré, ol. 4, n<sup>o</sup> 3, 1987, 203-230.
- [B] Ph. Bénilan, *Evolution equation and accretive operators*, Springer 1981, University of Kentucky, Lecture Notes taken by S. Lenhardt.
- [Ba] G. Barles, *Solution de viscosité des équations d'Hamilton-Jacobi*, Mathématiques et Application, Springer, 1994.
- [CIL] M. G. Grandall, H. Ishii, P. L. Lions, *User's guide to viscosity solutions of second order P.D.E.* Bull. Amer. Math. Soci. 27 (1992), 1-67.
- [G] B. H. Gilding, *Hölder continuity of solutions of parabolic equations*, J. Lond. Math. Soci. (2), 13 (1976), 103-106.
- [Kr] S. N. Kruzhkov, *Results concerning the nature of the continuity of solutions of parabolic equations and some of their applications*, Math. Zametki, 6 (1969), 97-108 (Transl. Math. Notes 6 (1969), 517-523).
- [LSU] O. A. Ladyzenskya, V. A. Solonnikov, N. N. Ural'ceva, *Linear and quasilinear equations of parabolic type*. Trans. Math. Monos. vol. 23, Amer. Math. Soci., Providence B. I. 1968.
- [LSV] P. L. Lions, P. E. Souganidis, J. L. Vázquez, *The relation between the porous medium equation and the Eikonal equations in several space dimension*, Rev. Math. Iberoam, vol. 3, n<sup>o</sup> 3 (1987), 275-310.
- [Ma] P. Marcati, *A result on hyperbolic aspect in the theory of porous media*, Bolle. Math. Ita. (7), 3.A (89), 69-75.
- [S] P. E. Souganidis, *Existence of viscosity solution of Hamilton-Jacobi equations*, J. Diff. Equa. 56, 345-390 (1985).

Laboratoire de Mathématiques    Recibido: 21 de Abril de 1995  
URA CNRS 741  
Université de Franche-Comté  
Route de Gray, 25030  
Besançon cedex  
France