# TP informatique n°5

*2 séances de 3 heures*

**Les réponses aux questions 1 à 7 sont à rendre sur papier lors de la première séance du TP, soit la semaine du 22 Novembre 2004.**

# Résolution numérique d'une équation différentielle: Application à la propagation de chaleur

## Introduction et présentation du TP

On se donne le problème suivant à résoudre: on suppose qu'à un instant donné (par hypothèse t=0 s) **un bloc magmatique de granite de 11 km de profondeur est exhumé à la surface terrestre**. On suppose que ce bloc possède une température uniforme T= 825°C à cet instant. Parallèlement, on suppose que la température sous ce bloc (croûte terrestre) est également uniforme T= 100°C à l'instant t=0 s jusqu'à la profondeur z=80 km. Au cours du temps, pour t>0, le bloc magmatique *chaud* va se refroidir au contact de la croûte *froide* dessous. Dans ce TP, on veut étudier **quantitativement** comment se propage la chaleur en fonction de la profondeur et en fonction du temps entre ces deux couches.
La question précise que l'on se pose est: "**comment la chaleur se propage par conduction sur ces 80 km en fonction du temps?**" ou encore, "**quel est le champ de température T** en fonction du temps et de la profondeur sur les 80 km?"

Dans la partie 1, après une introduction générale à l'équation de la chaleur, on présentera l'équation à résoudre dans le cas particulier de notre problème. On aboutira à une équation différentielle à deux variables, le temps t et la profondeur z.

Dans la partie 2, on présentera une des méthodes à utiliser pour résoudre une telle équation différentielle numériquement (à l'aide d'un programme informatique). On introduira notamment la notion de schéma numérique *explicite*.

Dans la partie 3, on vous guidera pour l'implémentation d'un tel schéma dans un programme Pascal.

Enfin, dans la partie 4, on vous demandera d'écrire votre projet Delphi, d'afficher vos résultats et de les représenter graphiquement.

# 1 Introduction à l'équation de la chaleur dans la cas d'un transfert de chaleur par conduction

## 1.1 *Préambule au cours de chaleur (modules L2 et L5)*

– Le concept de **conduction de chaleur** repose sur le principe de différence de température $\Delta T$ entre deux points: la chaleur est toujours conduite des **zones de haute température vers des zones de basse température**.
  Ce concept nous est "donné" directement par la loi de Fourier:

$$\boxed{\vec{q}(M,t) = -k\,\overrightarrow{grad}\,T(M,t)}$$

  dans laquelle $\vec{q}$ est le flux de chaleur par unité de surface en W/m$^2$ au point $M$ à un temps t, $k$ la conductivité thermique du milieu en W$\cdot$ m$^{-1}\cdot$ K$^{-1}$ toujours positive (on y revient ci-dessous) et T$(M,t)$ est **le champ scalaire de température au point $M$ à un temps $t$**. Cette loi nous dit clairement que **le flux de chaleur ou transfert de chaleur** au point $M$ est toujours orienté vers les températures décroissantes (orientation du vecteur $-k\,\overrightarrow{grad}\,T(M,t)$ toujours orienté vers les températures décroissantes), en d'autre termes la chaleur est toujours conduite des milieux *chauds* vers les milieux *froids*.

– Par conduction de chaleur, on sous-entend qu'**il n'y pas de mouvement de matière**, le tranfert de chaleur se fait essentiellement par collisions atomiques, sans mouvement macroscopique de matière. Pour bien différencier la conduction de la convection (transfert de chaleur avec mouvement de matière), prenons un exemple. Lorsqu'on chauffe une casserole d'eau sur une plaque électrique, deux cas de figure se présentent:
  - soit on n'observe pas de mouvement d'eau à l'intérieur de la casserole, et dans ce cas, la chaleur est transférée de la plaque vers le volume d'eau (puis éventuellement évacuée dans l'air) uniquement par **conduction**.
  - soit on observe du mouvement dans la casserole, l'eau bouillit et dans ce cas, la chaleur est transférée par **convection** dans le volume d'eau (puis dans l'air).

– Tous les matériaux ne *transmettent* ou ne *conduisent* pas la chaleur de la même manière, par exemple les métaux conduisent beaucoup mieux la chaleur que les matières plastiques. La grandeur caractérisant le transfert de chaleur dans un matériau est **la conductivité thermique k** intervenant dans la loi de Fourier. Dans l'équation de diffusion de la chaleur ci-dessous (qui est un cas particulier de l'équation générale de la chaleur dans lequel on ne considère que des transferts de chaleur par conduction) c'est la **diffusivité thermique** $\kappa$ en m$^2/s$ et non pas la conductivité thermique qui intervient pour caractériser le transfert de chaleur. Par définition,

$$\boxed{\kappa = \frac{k}{\rho C_p}}$$

où $\rho$ est la masse volumique du matériau en kg/m$^3$ et $C_p$ est la quantité d'énergie par unité de masse qu'il faut fournir pour augmenter de 1°C le milieu considéré.

L'équation générale de **diffusion de la chaleur** s'écrit:

$$\boxed{\frac{\partial T}{\partial t}(M,t) = \kappa \Delta T(M,t)} \tag{1}$$

Cette équation vous sera démontrée et commentée plus en détail dans le module L2. Pour l'heure, faisons les premiers commentaires sur cette équation.

**a) L'opérateur de diffusion, le laplacien $\Delta$**

L'équation de diffusion nous dit qu'à un temps t donné, le champ de température T$(M,t)$ en un point $M$ varie ($\frac{\partial T}{\partial t} \neq 0$) si la chaleur est en train de "diffuser", c'est à dire si le laplacien du champ de température $\Delta T(M,t)$ n'est pas égal à 0 au point $M$. Un laplacien non nul signifie que la température n'est pas homogène (ou constante) dans l'espace, ce qui veut dire qu'il existe des derivées partielles du second ordre non nulles $\Big(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \neq 0$ ou/et $\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \neq 0$ ou/et $\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \neq 0$ pour le laplacien en coordonnées cartésiennes$\Big)$. Par ailleurs, l'opérateur de diffusion $\Delta$ a pour effet d'**homogéneiser** le champ de température, c'est à dire réduire les différences de température dans le milieu: il "**diffuse**" la chaleur au sens propre du terme. En effet, si on laisse diffuser une anomalie de température dans un milieu "assez longtemps", l'état final thermique du milieu est une température constante en tout point.

Exemple: Prenons un cube de cuivre de 10 cm de côté et chauffons le bloc sur une des faces avec un briquet. A la fin du chauffage, il existe une anomalie du champ de température très forte dans le voisinage du point où l'on a chauffé, i.e. les dérivées spatiales de second ordre du champ de température sont non-nulles ($\Delta T \neq 0$). Suite au chauffage, l'anomalie chaude de température sur une des faces du bloc diffuse d'une part dans le volume du bloc plus froid et d'autre part diffuse du métal vers l'air environnant plus froid. Si on attend suffisamment longtemps, la chaleur continue à diffuser jusqu'à ce que le bloc de cuivre ait retrouvé une température constante ($\simeq$ température de l'air environnant).

**b) La diffusivité thermique $\kappa$**

Plus la diffusivité thermique du milieu $\kappa$ est grande et plus la chaleur est rapidement diffusée. Cela se remarque dans l'équation de diffusion: si on se fixe un $\Delta T$ dans le second membre ($\Delta T$ négatif si le milieu évacue de la chaleur car dans ce cas $\frac{\partial T}{\partial t} < 0$), plus $\kappa$ est grand et plus le terme $| \kappa \Delta T |$ est grand.

Exemple: La diffusivité thermique $\kappa$ du cuivre est bien plus grande que la diffusivité $\kappa$ d'un bois quelconque: si on chauffe un volume donné de bois et de cuivre à la même température puis on arrête brusquement le chauffage, la chaleur diffusera beaucoup plus rapidement du cuivre vers l'air que du bois vers l'air: le transfert de chaleur sera beaucoup plus efficace dans le cas du cuivre que dans le cas du bois. C'est pour cette raison que l'on dit que **le cuivre est un excellent conducteur thermique**.

**c) Ordre de grandeur dans l'équation de chaleur**

On peut réécrire l'équation de la chaleur sous la forme suivante :

$$\frac{\partial T}{\partial t}(M,t) \ / \ \Delta T(M,t) = \kappa$$

On constate que **c'est le coefficient de diffusion thermique qui contrôle le transfert de chaleur** dans un problème de conduction thermique; c'est lui qui quantifie la variation de température en un point par rapport à la diffusion de chaleur. Il existe beaucoup de situation en physique où on se retrouve face à une équation de ce type là. Plutôt que de résoudre complètement l'équation (ce qui peut être fastidieux et nécessiter un ordinateur comme dans notre TP), on fait **un calcul d'ordre de grandeur**: on dit que $\partial T$ est proportionnel à une petite différence de température $T_0$, $\partial t$ est proportionnelle à un temps $t_0$ et $\Delta T$ est proportionnelle à une différence de température que divise une distance au carré $L_0^2$ (car le laplacien fait intervenir des derivées spatiales du second ordre). On peut donc réécrire l'équation de la chaleur en ordre de grandeur:

$$\frac{\partial T}{\partial t}(M,t) \ / \ \Delta T(M) = \kappa \qquad \Rightarrow \frac{T_0}{t_0} \ / \ \frac{T_0}{L_0^2} \propto \kappa$$

$$\boxed{\Rightarrow \frac{L_0^2}{t_0} \propto \kappa}$$

On se retrouve donc avec une relation liant un **temps caractéristique** $\mathbf{t_0}$ pour notre système, une **longueur caractéristique** $L_0$ et **la diffusivité thermique** $\kappa$. Cette relation est fort utile pour faire des calculs de premier ordre sur le temps de propagation (ou la distance de propagation) de la chaleur en utilisant les grandeurs caractéristiques du système.

Comment utiliser cette relation? de deux manières:

· Soit: une anomalie de température ou un changement de température $\delta T_0$ (quelle que soit la valeur de l'anomalie!) mettra un temps de l'ordre de $L_0^2/\kappa$ secondes (vérifier que $L_0^2/\kappa$ est bien homogène à un temps) pour parcourir

une distance $L_0$ dans un milieu de diffusivité $\kappa$.
·Soit: une anomalie de température ou un changement de température $\delta T_0$ (quelle que soit la valeur de l'anomalie!) se propagera sur une distance $\sqrt{\kappa\, t_0}$ en un temps $t_0$ dans un milieu de diffusivité $\kappa$.
Exemple:Prenez toujours un bloc de cuivre de 10 cm de côté et chauffez-le sur l'une des faces. La diffusivité thermique du cuivre vaut $\kappa = 1.2\ 10^{-4}\ m^2/s$. D'après notre calcul d'ordre de grandeur l'anomalie de température devrait "atteindre" la face opposé du cube de cuivre en $\frac{L_0^2}{\kappa} = \frac{0.1^2}{1.2\ 10^{-4}} \simeq 88$ secondes. Vérifiez vous-même la pertinence de ce calcul d'ordre de grandeur en chauffant d'un côté et en mettant votre main sur le côté opposé du bloc de cuivre!

## 1.2 L'équation de diffusion à résoudre

Dans le problème posé dans l'énoncé, l'équation générale de diffusion de la chaleur se réduit à:

$$\boxed{\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}} \tag{2}$$

où T est le champ de température en °C au point $M$ (profondeur z) au temps t, $\kappa$ est la diffusivité thermique du milieu en $m^2/s$. Pour simplifier l'équation générale de diffusion (1) et aboutir à (2), on a fait l'hypothèse qu'il n'y a pas de gradients horizontaux de température faisant intervenir les coordonnées $x$ et $y$. On se retrouve donc avec l'équation de la chaleur à une dimension z (profondeur).

Pour résoudre complètement le problème du bloc magmatique, on a besoin de données supplémentaires:

- *Les diffusivités thermiques des deux milieux.*
  **Le bloc magmatique a une diffusivité thermique** $\kappa = 9 \cdot 10^{-7}\ m^2/s$ lorsque la température en son sein est inférieure à 725 °C et $\kappa = 4.5 \cdot 10^{-7}\ m^2/s$ lorsque T $\geq$ 725 °C.
  **La diffusivité thermique de la croûte terrestre** sous le bloc est constante quelle que soit la température et vaut $\kappa = 8.33 \cdot 10^{-7}\ m^2/s$.
- *Les conditions limites thermiques du problème à* $z = 0$ et $z = 80$ km.
  · On suppose que le flux de chaleur en surface à $z = 0$ km est nul.

<u>Question 1</u> **Que signifie cette condition de flux nul en surface? Dans quelle direction est conduite toute la chaleur provenant du bloc? Est-ce que cette condition est bien réaliste?**

· A la profondeur $z = 80$ km, on suppose que la température est constante au cours du temps, c'est à dire que T($z = 80$ km,$t$)=100 °C $\forall t$.

Le problème posé est schématisé sur la figure 1.

*N.B.* : On ne peut pas résoudre *analytiquement* ce problème dès lors que l'on choisit des diffusivités thermiques différentes entre le bloc et la croûte.

Nous sommes contraints dans ce cas de recourir à une solution numérique (ou informatique).

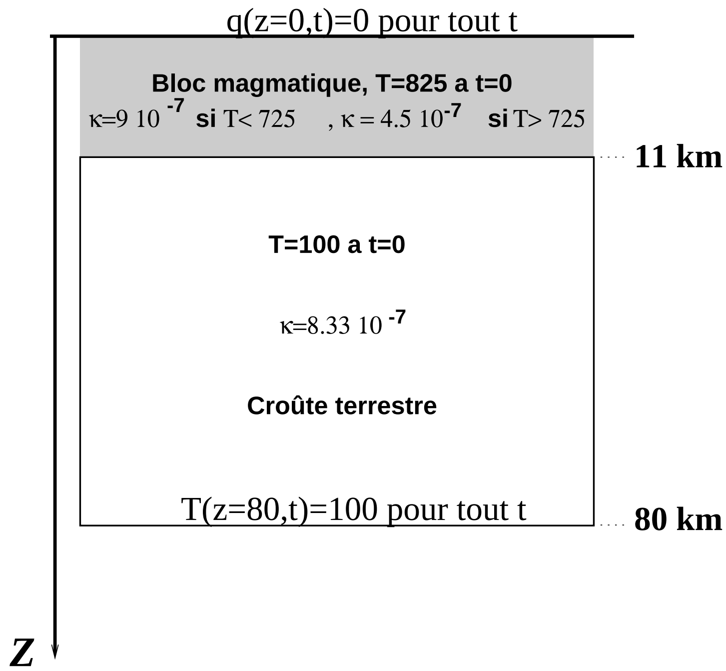


FIG. 1 – *Problème à résoudre.*

# 2 Le schéma numérique

## 2.1 Présentation du schéma *explicite*

Pour résoudre ce problème nous utilisons un *schéma numérique explicite* à l'aide duquel nous calculons l'évolution de la température en fonction du temps.

Rappelons l'équation à résoudre

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$$

Nous introduisons un schéma numérique à l'aide de développements de Taylor d'une fonction à une variable autour d'un point (voir cours L1).
Soit,

$$\begin{aligned} T(t+dt) &= T(t) + \frac{\partial T}{\partial t} dt + O(dt^2) \text{ (voir figure 2)} \\ &= T(t) + \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} dt + O(dt^2) \end{aligned} \tag{3}$$

De même on peut écrire la valeur du champ de température au point (z+dz) à partir de la valeur de T au point z et les dérivées spatiales du champ T.

$$T(z+dz) = T(z) + \frac{\partial T}{\partial z} dz + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} (dz)^2 + \frac{1}{6} \frac{\partial^3 T}{\partial z^3} (dz)^3 + O(dz^4) \tag{4}$$

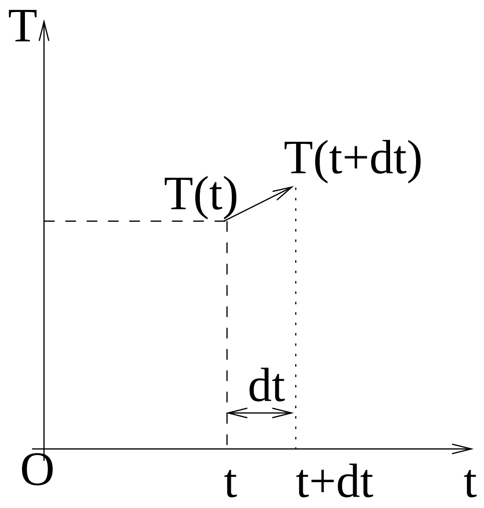


FIG. 2 – *La valeur de la température $T$ au temps $t + dt$ est basée sur la valeur de la dérivée $\frac{\partial T}{\partial t}$ au point $t$. La valeur de $T$ au temps $t$+$dt$ est égale à la valeur de $T$ au temps $t$ plus $dt$ que multiplie le coefficient directeur de la tangente de $T$ au temps $t$, à une petite erreur près de l'ordre de $dt^2$.*

**<u>Question 2</u> Ecrire ce développement de Taylor au point T(z-dz). Additionner T(z+dz) et T(z-dz) et en déduire une égalité entre $\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$ et une expression composée de T(z+dz), T(z-dz), T(z), dz.**
**A partir de cette égalité, reutiliser l'équation (3) pour finalement obtenir**

$$T(z,t+dt) = T(z,t) + \kappa\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = T(z,t) + \kappa\left[\frac{T(z+dz,t) - 2T(z,t) + T(z-dz,t)}{dz^2}\right]dt \quad (5)$$

C'est le schéma numérique que nous allons utiliser dans notre programme informatique pour résoudre l'équation de la chaleur.

Il est important de comprendre qu'en **utilisant cette expression, on calcule au point M à la profondeur z la température T au temps** $(t + dt)$ **solution de l'équation de la chaleur (2) à partir d'une part de la température au temps** $(t)$ **en M et d'autre part du champ de température aux points voisins de M (en z+dz et z-dz) au temps t.**

Ce schéma, faisant intervenir 4 points ou noeuds (voir plus loin), est illustré sur la figure 3.

Ce schéma est dit *explicite* car la température au temps $(t + dt)$ dépend *explicitement* du champ de température au temps $(t)$. (Ce n'est pas le cas d'autres schémas numériques, les schémas *implicites* par exemple).

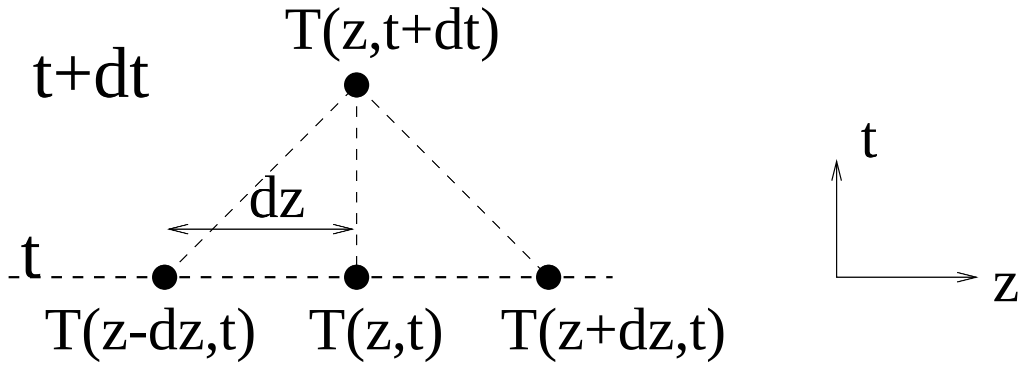


FIG. 3 – *La valeur de la température $T$ au point $z$ au temps $t + dt$ est obtenue à partir de la valeur de $T$ en $z$ au temps $t$, de la valeur au point z-dz au temps t et de la valeur en z+dz au temps t.*

# 3 Comment implémenter un tel schéma numérique dans un programme Pascal

Procédons par étapes:

*Etape 1: Le maillage*

**Le champ de température scalaire** que l'on cherche à calculer dépend du temps et de l'espace, soit $T(z,t)$ une fonction de deux variables. Par conséquent, on définit un *maillage* couvrant le domaine en temps et en espace où l'on veut calculer la solution; c'est un domaine où l'on a en abscisse la profondeur $z$ de 0 à 80 km et en ordonnées le temps à partir de t=0 jusqu'au dernier temps t choisi pour notre calcul. Ce maillage est schématisé sur la figure 4: en abscisse, on a la profondeur z avec $Nz+1$ points tel que $Nz*dz$ ($dz$ étant la distance entre deux points du maillage, appelé le **pas d'espace**) =80 km. Cela fait donc $Nz$ intervalles. En ordonnées, on a le temps t avec $Nt+1$ points tel que $Nt*dt$ ($dt$ étant l'intervalle de temps entre deux points du maillage, appelé le pas de temps) = $\Delta t$ secondes, la durée totale de notre calcul.
En chaque point ou *noeud* du maillage, on calcule la température à l'aide du schéma explicite (5). A chaque *itération* en temps dans notre calcul lorsqu'on applique le schéma (5), on progresse d'un point (ou noeud) dans la direction (Ot) sur la figure 4.
Il faut bien comprendre que dans notre calcul on commencera par donner des valeurs du champ T au temps t=0 (axe des abscisses sur la figure 4) à chaque profondeur $z$, puis en appliquant le schéma à chaque pas de temps, on progressera de ligne en ligne dans notre maillage, vers $t > 0$.

*Etape 2: Initialisation*

La deuxième étape consiste à *initialiser* toutes les variables de notre problème (par initialiser, on entend donner des valeurs aux variables avant de commencer à calculer). On écrit donc le champ de température en tout point de l'espace au temps $t = 0\ s$ (comme on l'a vu dans l'étape 1) et de plus on spécifie les conditions limites sur les bords de notre maillage, *i.e.* en $z = 0$ et $z = 80\ km$. Ces conditions limites sont détaillées sur la figure 4.

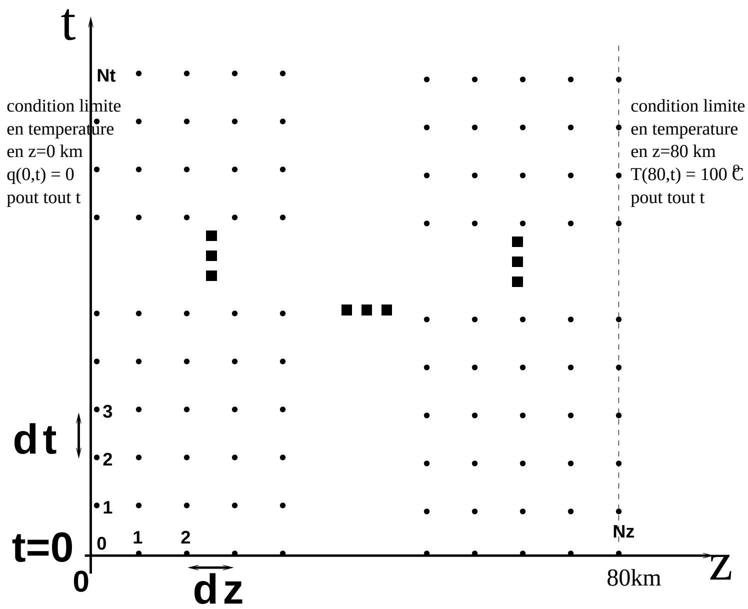


FIG. 4 – *Maillage en temps et en espace. Ce maillage comporte* $(Nt+1)*(Nz+1)$ *points ou noeuds.*

<u>Question 3</u> **Pourquoi est-il fondamental d'aprés le schéma numérique utilisé de se donner des conditions limites sur le premier point du maillage z=0 et le dernier point z=80 km? A quel problème se heurterait-on si on voulait calculer avec le schéma explicite la valeur du champ de température en ces points?**

*Etape 3: Application du schéma*

Pour la dernière étape, on applique le schéma explicite à tous les points de la grille exceptés au premier point du maillage en $z$ (puisque le flux est nul en z=0), et au dernier point du maillage en $z$ (puisqu'on a considéré une valeur constante de T en ce point au cours du temps).

La figure 5 donne l'algorithme à utiliser dans notre programme basé sur les 3 étapes décrites ci-dessus.

Remarque: pour la *stabilité* du calcul on doit prendre des pas en espace et en temps qui satisfont la relation $dt < \frac{1}{2}\frac{(dz)^2}{\kappa}$.

<u>Question 4</u> **Justifier pourquoi un flux nul en surface revient à écrire T[0,t]=T[1,t] $\forall$ t dans l'algorithme de la figure 5. En déduire pourquoi il est inutile de calculer la valeur du champ de température en z=0.**

<u>Question 5</u> **Ecrire en Pascal le programme associé à l'algorithme de la figure 5.**

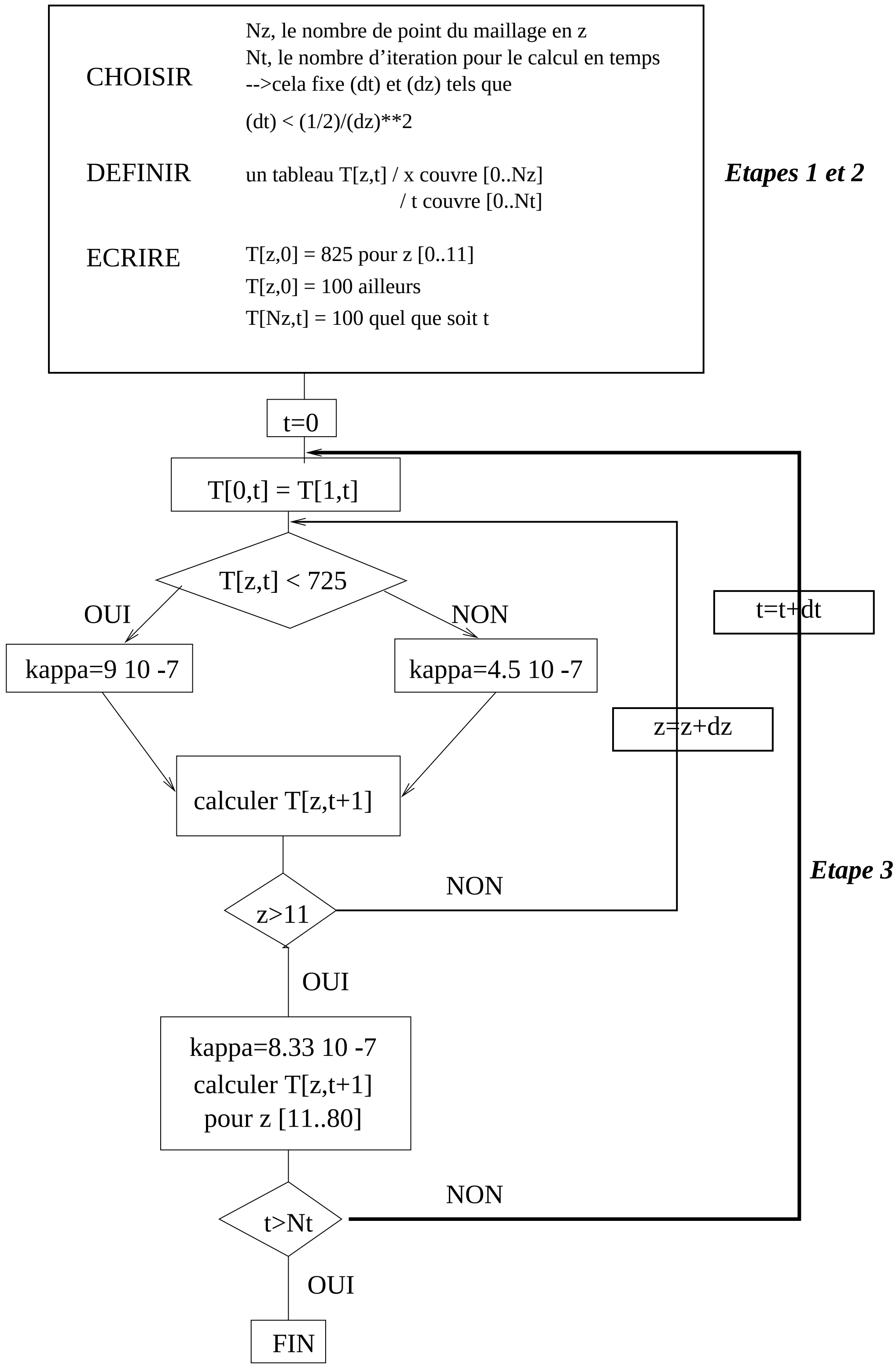


FIG. 5 – *Algorithme de programmation du TP5.*

# 4 Programmation du projet Delphi

## 4.1 Les objets du programme

Nous utilisons 3 *objets* dans le programme:

- Un objet *Menu* (objet *MainMenu*) avec la possibilité de QUITTER, CALCULER, DESSINER.
- Un objet *Memo* ou l'on va afficher les paramètres choisis et les résultats du calcul. (Ajouter l'option Scrollbar dans l'inspecteur d'objet pour pouvoir regarder toute la fenêtre *Memo* en vertical).
- Un objet *Image* (dans la bibliothèque Supplément) où seront représentés graphiquement les résultats du calcul à différents temps.

Remarque: Vous pouvez regarder un exemple de corrigé dans le repertoire Share.

## 4.2 Programmation de l'algorithme sous Delphi

### 4.2.1 Programmation des étapes 1 et 2

Pour commencer, on choisit un pas $dz$ = 1 km = 1000 m de telle sorte que $Nz = 80$ si l'on couvre un domaine de 80 $km$ de profondeur ($Nz * dz$=80 km). Le maillage en z comporte donc 81 points.

Question 6 **Quelle est alors la valeur maximale de $dt$ permise d'après la condition de stabilité du schéma numérique? (Prenez la diffusivité de la croûte pour ce calcul).**

Question 7 **Trouver approximativement combien de temps doit "durer" notre calcul pour que la chaleur du bloc magmatique ait eu le temps de diffuser jusqu'à la profondeur $z = 80\ km$, gràce à un calcul d'ordre de grandeur avec la valeur de la diffusivité $\kappa$ de la croûte terrestre et l'épaisseur totale comme longueur caractéristique ($L_0 = 80$ km). En déduire $Nt$ basé sur le $dt$ de la question 6).**

(On pourra prendre par exemple, dz=1000, dt=15000 ans (à convertir en secondes!!), $Nz = 80$, $Nt = 3000$ si cela correspond approximativement à **vos réponses** aux questions 6) et 7)!!).

Le programme aura classiquement:
- une déclaration de constantes globales
- une déclaration de variables globales
- 4 procédures: $Tform1.create$ (initialisation; *remarque*: c'est une procédure éxécutée dès la fin de la compilation, double-cliquez à n'importe quel endroit dans la fiche objet pour la faire apparaître dans l'unité *Pascal*), $Tform1.Quitter1Click$ (pour quitter le programme), $Tform1.Calcul1Click$ (procédure à programmer avec le schéma explicite), $Tform1.Dessin1Click$ (procédure représentant les résultats de l'intégration numérique sur un graphe X=profondeur (z), Y= température T(z,t) et où différentes courbes T(z,t)

sont dessinées à différents temps de calcul t, voir paragraphe 4.3).

Nz et Nt seront rentrées comme constantes, T[,] (tableau de réels à double entrées espace et temps, attention aux DIMENSIONS du tableau),$dt$, $dz$, $\kappa$, $z$, $t$ seront des variables locales ou globales (à vous de voir, penser à la procédure de dessin...). Les autres tâches des étapes 1 et 2 seront effectuées dans la procédure $Tform1.create$, en particulier l'initialisation du tableau T[,] et le choix de $dz$ et $dt$ en fonction du critère de stabilité.

**Rajouter un titre** dans la fenêtre *Memo* "Refroidissement par contact" et afficher les valeurs de $dt$ et $dz$ choisies.

Remarque: Il sera intéressant de définir une constante globale dans le programme convertissant une année en secondes afin d'alléger la programmation.

### 4.2.2 Programmation de l'étape 3

**Ecrire les boucles en z et t du schéma numérique**.

Le schéma numérique (5) peut se réécrire en notation indicielle adaptée à un tableau T[i,n]

$$T_i^{n+1} = T_i^n + \kappa \left[ \frac{T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n}{dz^2} \right] dt$$

En écrivant ces boucles et en déroulant le schéma numérique explicite, on remplit le tableau T[,] avec les valeurs de la température aux différentes profondeurs et aux différents temps.

**S'assurer du "bon comportement"" du calcul en affichant l'évolution de T[,] à certaines valeurs de $z$ dans l'objet** *Memo*. (S'inspirer de l'exemple de correction dans Share).

*Remarque:* Réaliser cet affichage revient à sélectionner certaines valeurs du tableau T[,] et à afficher leurs contenus dans *Memo*. En effet, toutes les valeurs du tableau T[,] pour tous $t$ et tous $z$ sont stockées dans la mémoire de l'ordinateur dès la fin de la boucle de calcul (c'est l'avantage des tableaux).

Delphi: Pour selectionner certaines valeurs dans une boucle, vous pourrez utiliser la syntaxe suivante:

```
for i:=0 to 100 do if i in [10,20 ...] then
begin
commande Pascal;
end;
```

## 4.3 Représentation des résultats dans un objet Image

### 4.3.1 Représentation dans l'objet Image des profils de température

Comme dans le TP3 et le TP4, il vous est demandé de représenter graphiquement vos résultats.
La procédure que vous allez programmer sera très proche de la procédure de dessin du TP4, dans l'ordre:
- définir la taille de l'image, hauteur, largeur, introduire des marges.
- définir des "vecteurs unitaires" pour l'axe des abscisses et des ordonnées.
- dessiner les graduations sur les axes.
- titre de la figure.
- colorier le bloc magmatique (voir exemple dans Share) avec par exemple les commandes brush.color:=clYellow; Fillrect(r); où r est r un rectangle de type $Trect$.
- dessiner le profil de température initial au temps t=0.
- dessiner des profils à différents temps de calcul en utilisant les valeurs du tableau remplies dans la procedure de calcul.

## 4.4 Représentation dans l'objet Image des maxima de température pour chaque profondeur $z$

Ecrire une boucle dans la procédure $Dessin1click$ destinée à représenter les maxima de température à chaque profondeur $z > 11$ km. Pour cela il faudra écrire une boucle recherchant la valeur maximale de T[,] à une profondeur donnée en faisant varier le temps. Représenter les maxima avec des rectangles rouges à chaque z.