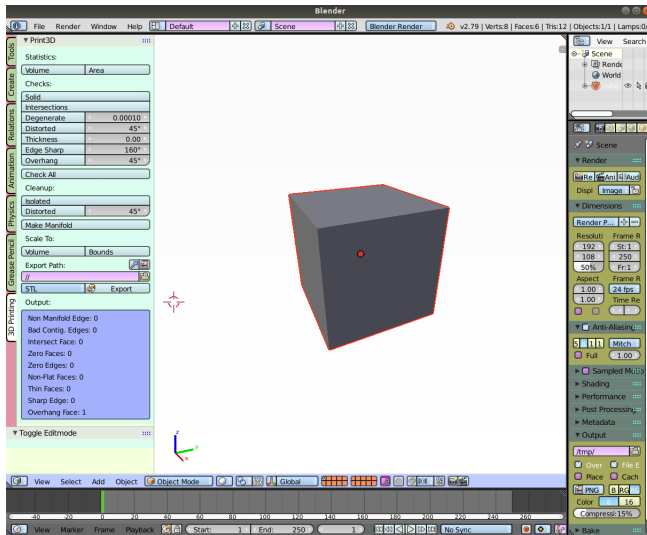


Master 2P, spécialité ISV, 2024-2025
UE 4TIS904U "Acquisition, Reconstruction et Modélisation"
Analyse et réparation de surfaces 3D

L'objectif de ce travail est de développer des outils pour l'analyse et la réparation de certains défauts d'un maillage qui permet de le transformer dans un maillage imprimable. On pourrait s'inspirer d'outils existants dans *Meshlab* et *Blender*, illustrés sur la Fig. 1.



(a) Wavefront OBJ, importation

```
# Blender v2.79 (sub 0) OBJ File: ''
# www.blender.org
mtllib blender-cube.mtl
o cube
v -10.000000 -10.000000 -10.000000
v 10.000000 -10.000000 -10.000000
v 10.000000 -10.000000 10.000000
v -10.000000 -10.000000 10.000000
v 10.000000 10.000000 -10.000000
v 10.000000 10.000000 10.000000
v -10.000000 10.000000 -10.000000
v -10.000000 10.000000 10.000000
vn 0.0000 1.0000 0.0000
vn 1.0000 0.0000 0.0000
vn 0.0000 1.0000 0.0000
vn -1.0000 0.0000 0.0000
vn 0.0000 0.0000 -1.0000
vn 0.0000 0.0000 1.0000
usemtl None
s off
f 1//1 2//1 3//1 4//1
f 2//2 5//2 6//2 3//2
f 5//3 7//3 8//3 6//3
f 7//4 1//4 4//4 8//4
f 7//5 5//5 2//5 1//5
f 4//6 3//6 6//6 8//6
```

(b) Wavefront OBJ, exportation

FIGURE 1 – Blender : analyse d'un maillage 3D construit à l'importation d'un fichier au format Wavefront OBJ

Exercice 1 *Analyse de la validité topologique et géométrique*

Pour chacun des défauts d'un maillage 3D listés ci-dessous, proposer et implémenter une méthode pour sa **détection** à partir d'un fichier OBJ.

1. Présence d'éléments (sommets, arêtes et faces) isolés et/ou dégénérés : Fig.2
2. Sommets et arêtes non-variétés : Fig. 3
3. Auto-intersection et recouvrement d'éléments : Fig. 4b
4. Orientation cohérente des faces : Fig. 8
5. Maillages avec bords et défauts de volume fermé : Fig. 4a, Fig. 5b.

Exercice 2 *Réparation de la validité topologique et géométrique*

Pour deux des défauts d'un maillage 3D listés ci-dessus (au choix) , proposer et implémenter une méthode de **réparation**.

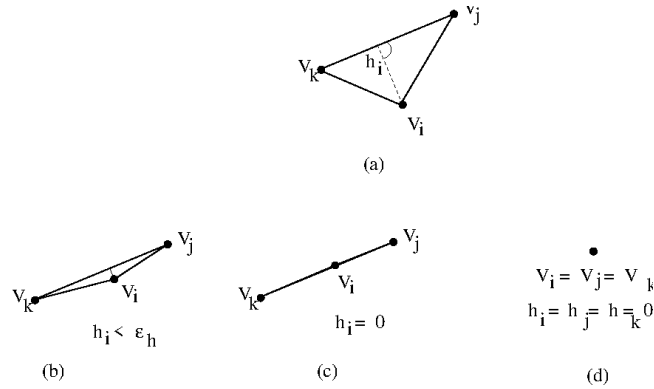
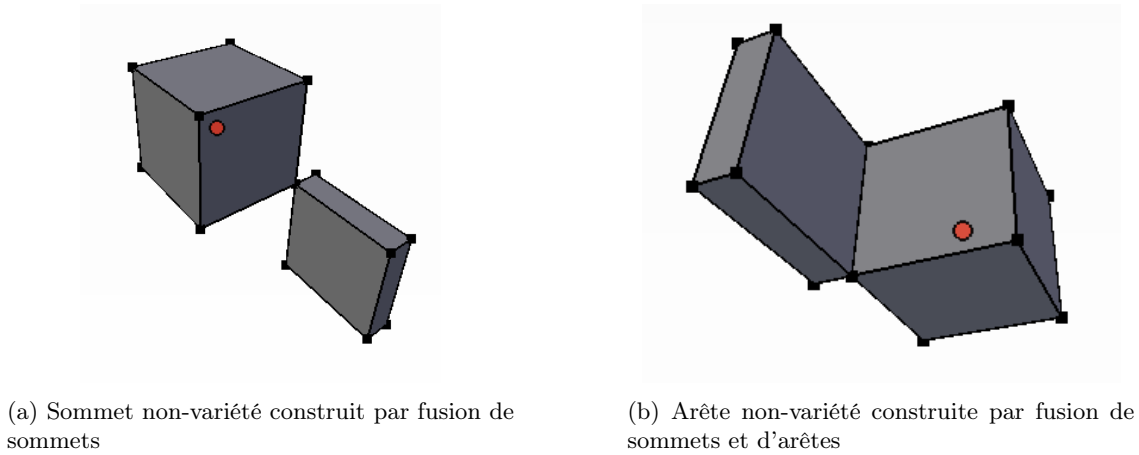


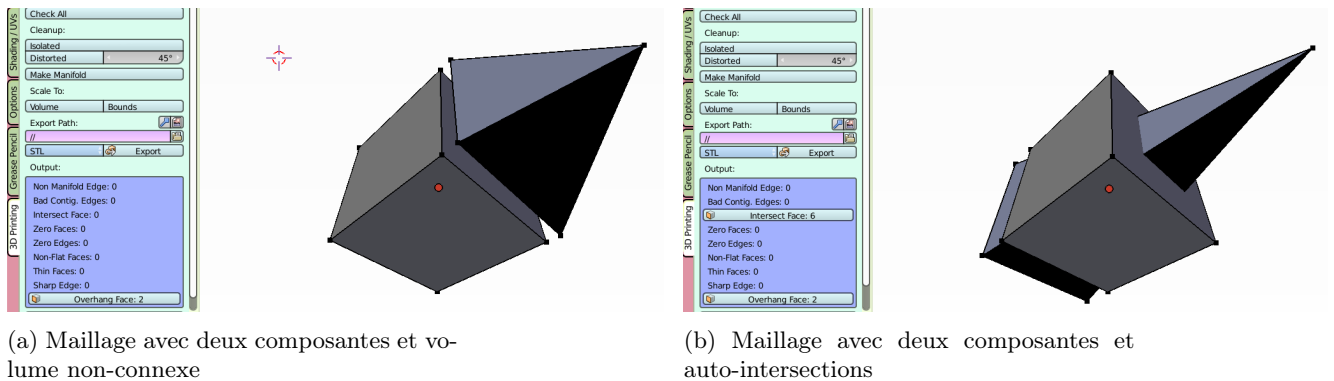
FIGURE 2 – Maillage 3D : (a) Face triangulaire (b) Triangle "aplati" (c) Triangle dégénéré : sommets colinéaires (d) Triangle dégénéré : sommets confondus



(a) Sommet non-variété construit par fusion de sommets

(b) Arête non-variété construite par fusion de sommets et d'arêtes

FIGURE 3 – Conditions de non-variété



(a) Maillage avec deux composantes et volume non-connecté

(b) Maillage avec deux composantes et auto-intersections

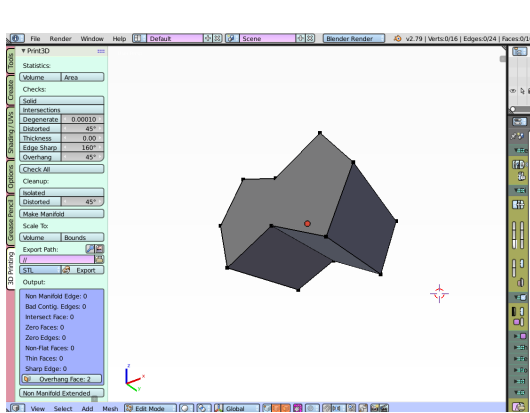
FIGURE 4 – Blender, "3D Printing, Check all"

Modalités de validation des résultats obtenus :

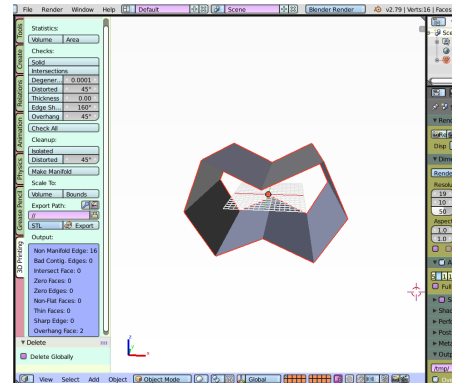
Remise d'une archive avec le **compte rendu** et le **code source** sur l'ensemble des expérimentations effectuées.

Date de remise : **17/12/2024**

1. Choisir un maillage reconstruit à partir d'un nuage de point (on pourra utiliser certains des



(a) Maillage imprimable



(b) Maillage non-imprimable : coquille sans épaisseur

FIGURE 5 – Blender : test d'imprimabilité ("Add-on : 3D Printing")

maillages obtenus par les simplifications/reconstructions en *TD 1 et TD 2*) et un maillage de synthèse.

Appliquer la recherche et la réparation des défauts traités précédemment.

2. Donner des illustrations graphiques et incorporer les tableaux récapitulatifs de la recherche et la réparation de ces défauts avec vos outils.
3. Donner des illustrations graphiques et incorporer les tableaux récapitulatifs de la détection et la réparation de ces défauts avec *Meshlab* ou *Blender*
4. Donner une analyse comparative des résultats obtenus par vos outils et par *Meshlab* ou *Blender*.

Références :

[1] "Geometric and Solid modeling : An Introduction", Christoph M. Hoffman, Morgan Kaufmann Publishers

<https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1884&context=cstech>

[2] "An Introduction to Solid Modeling", Marty Mäntylä, Comput. Sci. Press

extraits choisis sont disponibles en ligne :

<http://www2.ensc.sfu.ca/ensc/people/faculty/kamal/teaching/887/course-material-soft-copies/polyhedra-rep/Polyhedra-rep-Mantyla.pdf>

[3] "From 3D models to 3D prints : an overview of the processing pipeline"

Marco Livesu, Stefano Ellero, Jonàs Martínez, Sylvain Lefebvre, Marco Attene
Comput. Graph. Forum 36(2) : 537-564 (2017)

<https://arxiv.org/pdf/1705.03811>

[4] "As-exact-as-possible repair of unprintable STL files", Marco Attene

Journal reference : Rapid Prototyping Journal (2018)

<https://arxiv.org/pdf/1605.07829>

[5] "Computational geometry in C", Joseph O'Rourke, Cambridge University Press, 2nd edition 1998

[6] "Polygons and meshes", Paul Bourke

<https://paulbourke.net/geometry/polygonmesh/>

Annexe A : Rappels sur les fondements des représentations par frontières (BRep)

Orientation d'une face

Le choix de l'orientation d'une face définit la direction de sa normale \vec{n} .

Une face dont le bord est connexe, composé par un contour fermé d'arêtes, est illustrée sur la Fig. 6.

Une face dont le bord n'est pas connexe, composé d'un contour externe englobant l'intérieur de la face et un contour interne englobant un trou, est donnée sur la Fig. 7.

L'orientation d'un contour d'arêtes est choisie de telle sorte qu'en parcourant les arêtes selon cette orientation, l'intérieur de la face est toujours du même côté. Par la suite on fixera le côté sur la "gauche" comme illustré sur les exemples.

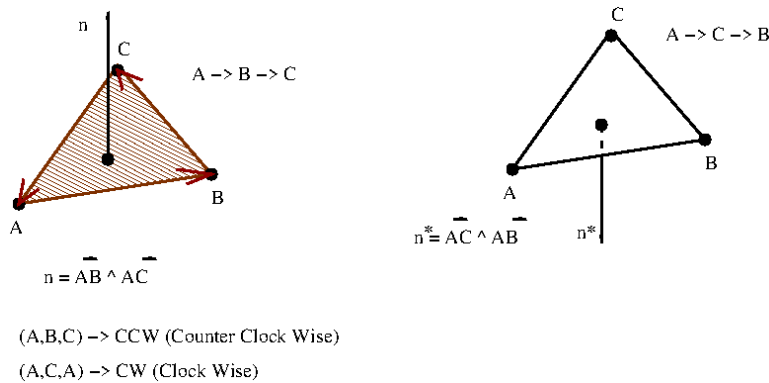


FIGURE 6 – Orientation d'une face de bord connexe

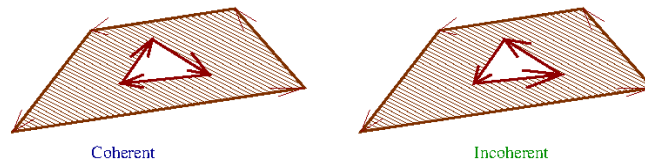


FIGURE 7 – Orientation d'une face de bord non connexe

Orientation d'un maillage

Un maillage connexe peut être orienté de manière cohérente si chaque une de ses arêtes est voisine à au plus deux faces.

Si l'arête est voisine à deux faces, elle doit être incluse avec des directions opposées dans chaque une de ces deux faces.

Si l'arête est voisine à une seule face, elle appartient au bord du maillage. Son orientation doit être telle que quand on parcourt l'arête, l'intérieur de la face est situé à gauche.

Un exemple de maillage orienté de manière cohérente est donné sur la Fig.8(gauche).

Un exemple d'orientation non-cohérente est illustré sur la Fig.8(droite).

Si le maillage est composé par plusieurs composantes connexes, une orientation cohérente peut être définie si l'ensemble des composantes connexes constitue le bord d'un volume fermé. Dans ce cas l'orientation des composantes est choisie de telle sorte que les normales aux faces pointent vers l'extérieur du volume.

Validité topologique

Pour qu'un maillage soit une variété topologique le voisinage d'un point de ce maillage doit être de l'un des trois types ci-dessous selon si :

- Le point est confondu avec un sommet : Fig. 9(gauche)
- Le point est sur une arête : Fig. 12(gauche)
- Le point appartient à l'intérieur d'une face : Fig. 15

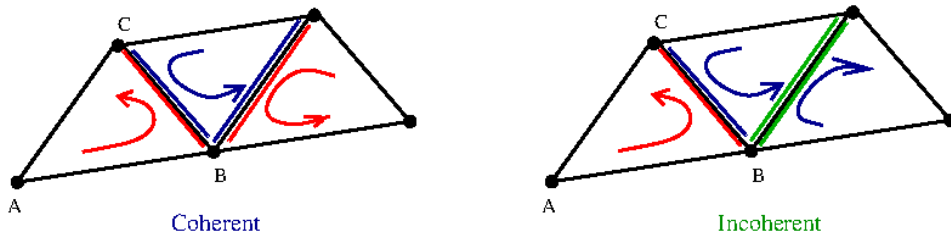


FIGURE 8 – Orientation d'un maillage

Dans le cas contraire on parle de maillage non-variété.

Un maillage qui est une variété topologique sans bords définit un maillage imprimable.

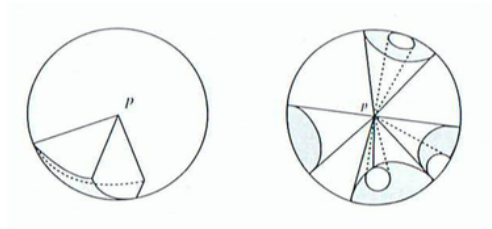


FIGURE 9 – Voisinage d'un sommet appartenant à : (gauche) 2D variété (droite) Non-variété

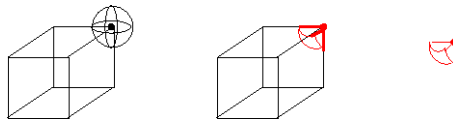


FIGURE 10 – Voisinage d'un sommet appartenant à une 2D variété

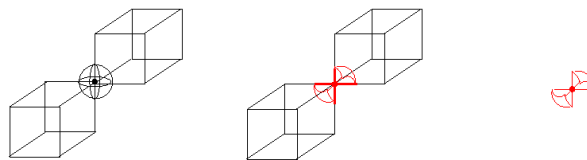


FIGURE 11 – Voisinage d'un sommet appartenant à une "non-variété"

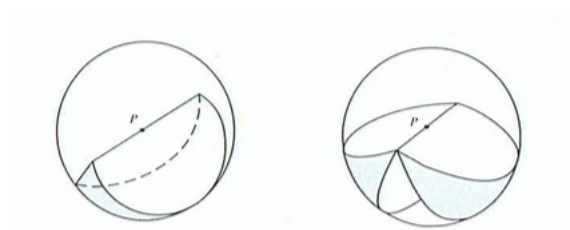


FIGURE 12 – Voisinage d'un point sur une arête appartenant à : (gauche) 2D variété (droite) Non-variété

Pour approfondir on pourrait se référer à [1] et [2].
 Pour l'analyse et la réparation des maillages on pourrait utiliser [3] et [4].

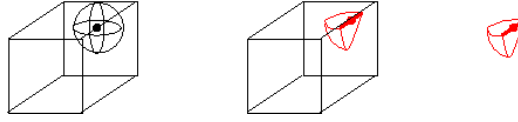


FIGURE 13 – Voisinage d'un point sur une arête appartenant à une 2D variété

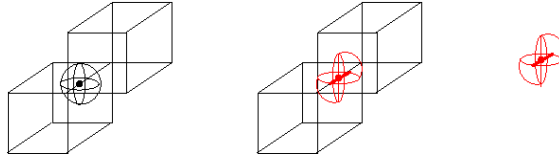


FIGURE 14 – Voisinage d'un point sur une arête appartenant à une "non-variété" 2D variété

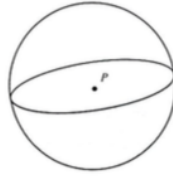


FIGURE 15 – Voisinage d'un point appartenant à une face d'un maillage 2D variété

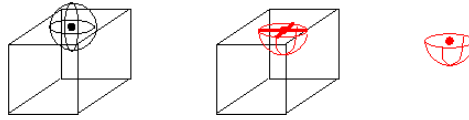


FIGURE 16 – Voisinage d'un point sur une face appartenant à une 2D variété

Annexe B

1. Conditions de **non-variété (NonManifold) (NM)**

Pour tester si un sommet v est un sommet non-variété, il suffit de tester que l'ensemble de faces voisines à f ne forme pas un cycle fermé, pour un sommet appartenant à l'intérieur du maillage, ou cycle ouvert, pour un sommet appartenant au bord du maillage). Voir algorithme 1.

Pour tester si une arête e est une arête non-variété il suffit de compter le nombre de faces voisines. Pour les arêtes non-variété ce nombre est supérieur à 2. Voir algorithme 2.

2. Éléments dégénérés

Une arête dégénérée est de longueur 0.

L'aire d'une face dégénérée est 0.

Soit f une face définie par la suite de sommets $V_0, V_1, \dots, V_{n-1}, V_n, V_0 = V_n$.

Soit O le centre de gravité, $O = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} V_i}{n}$

Soit A l'aire de f .

$$A = \left\| \sum_{i=0}^{n-1} \frac{\vec{OV}_i \times \vec{OV}_{i+1}}{2} \right\| \quad (1)$$

3. Intersections et recouvrements

De par la définition d'un maillage, deux faces sont soit disjointes soit ont un sommet ou une arête en commun. Ces relations de voisinages sont explicitement représentées dans le modèle BRep.

Dans le cadre du travail demandé on recherchera des sommets, arêtes et faces dont le

Algorithm 1 Check for NM vertex v

Require:

$F_{adj}(v)$ list of faces adjacent to v

$F_{adj}(f)$ list of faces adjacent to f , $f \in F_{adj}(v)$

Ensure: *True* if v is NM vertex, *False* otherwise

for all $f \in F_{adj}(v)$ **do**

 mark f as UNUSED

end for

$f \leftarrow f \in F_{adj}(v)$ such that f is marked as UNUSED

if $f \neq \text{NULL}$ **then**

repeat

 mark f as USED

$f_{next} \leftarrow \text{NULL}$

for all $f_{adj} \in F_{adj}(f)$ **do**

if $f_{adj} \in F_{adj}(v)$ such that f_{adj} is marked as UNUSED **then**

$f_{next} \leftarrow f_{adj}$

break

end if

end for

$f \leftarrow f_{next}$

until $f \neq \text{NULL}$

end if

for all $f \in F_{adj}(v)$ **do**

if f is marked as UNUSED **then**

 return True

end if

end for

return False

Algorithm 2 Check for NM edge e

Require: $F_{adj}(e)$ list of faces adjacent to e

Ensure: *True* if e is NM edge, *False* otherwise

return $\text{len}(F_{adj}(e)) > 2$

plongement géométrique introduit une intersection ou recouvrement. Ainsi pour chaque sommet v on cherchera à vérifier s'il ne coïncide pas avec un autre sommet du modèle (\mathbf{vv}), s'il n'appartient pas à une arête (\mathbf{ve}) ou à une face (\mathbf{vf}). Ces tests sont formalisés par les algorithmes 3, 4 et 5. On pourrait s'en inspirer aussi pour écrire les tests d'intersection et recouvrement de deux arêtes (\mathbf{ee}), d'une arête et d'une face (\mathbf{ef}) et de deux faces (\mathbf{ff}). On remarquera que l'ordre d'application des tests suit une dimension incrémentale des éléments testés. Le but étant que pour l'ensemble des voisinages $\mathbf{v}\{\mathbf{V}\}$, $\mathbf{v}\{\mathbf{E}\}$, $\mathbf{v}\{\mathbf{F}\}$, $\mathbf{e}\{\mathbf{E}\}$, $\mathbf{e}\{\mathbf{F}\}$, et $\mathbf{f}\{\mathbf{F}\}$ on détecte la présence d'intersections et recouvrements dans des éléments du maillage qui ne sont pas codés explicitement par le modèle BRep sous-jacent.

Algorithm 3 Check for vv vertex vertex intersection

Require:

$v \in V$, $w \in V$, $v \neq w$, V the set of all mesh vertices
 ϵ precision

Ensure: *True* if v is multiple vertex, *False* otherwise
return $\text{dist}(v,w) \leq \epsilon$

Algorithm 4 Check for ve vertex edge intersection

Require:

$v \in V$, V the set of all mesh vertices
 $e, e \in \{E \setminus E_{adj}(v)\}$, E the set of all mesh edges, $E_{adj}(v)$ the set of all edges adjacent to v
 ϵ precision

Ensure: *True* if there exists ve intersection, *False* otherwise

if $vv(v, \text{start}(e), \epsilon) == \text{True}$ or $vv(v, \text{end}(e), \epsilon) == \text{True}$ **then**
return *True*
end if
if v on \vec{e} **then**
 $v = e(t_v)$
 $\text{start}(e) = e(\vec{t}_{\text{start}})$
 $\text{end}(e) = e(\vec{t}_{\text{end}})$
if $t_{\text{start}} < t_v < t_{\text{end}}$ **then**
return *True*
end if
end if
return *False*

4. Bords

Un maillage avec bords ne définit pas un volume fermé. Pour tester si un maillage est sans bords il suffit de tester que chaque arête du maillage appartient aux contours d'exactly deux faces, avec des orientations opposées.

Le calcul des caractéristiques géométriques ci-dessous est simplifié. Pour approfondir on pourrait se référer à [5].

Algorithm 5 Check for vf vertex face intersection

Require:

$v \in V$, V the set of all mesh vertices

$f \in F \setminus F_{adj}(v)$, F the set of all mesh faces, $F_{adj}(v)$, the set of faces adjacent to v

ϵ precision

Ensure: *True* if there exists vf intersection , *False* otherwise

for all $w \in \partial f$ **do**

if $vv(v, w, \epsilon) == True$ **then**

 return *True*

end if

end for

for all $e \in \partial f$ **do**

if $ve(v, e, \epsilon) == True$ **then**

 return *True*

end if

end for

if v on f **then**

if $v \in f$ **then**

 return *True*

end if

end if

return *False*
