Les surfaces paramétriques

Ce cours est une **compilation** :

- Du cours de Modélisation géométrique (IRIT-UPS Toulouse; Equipe Vortex)
- Cours de Christian Jacquemin (LIMSI- Paris 11)
- Cours de Marc Daniel (LSIS- Marseille)
- Cours de E. Bechet (Université de Liège)
- Cours Antoine Brière-Côté (ETS, Canada)
- Cours G. Gesquière DUT Informatique- Arles
- Cours G. Gesquière Gamagora- Lyon

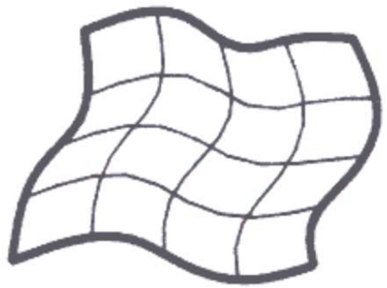
Plan

- Définition générale
- Produit tensoriel de deux courbes
  - Principe et définition
  - Tangentes, normales
  - Carreaux d'Hermite
  - Carreaux de Bézier
- Carreaux triangulaires de Bézier
- Patches de Coons

Représentation paramétrique

- Forme générale d'une surface paramétrée:
  - Pour une courbe, un seul paramètre est nécessaire :
    - x = x (u) y = y(u) z = z(u)

Curve

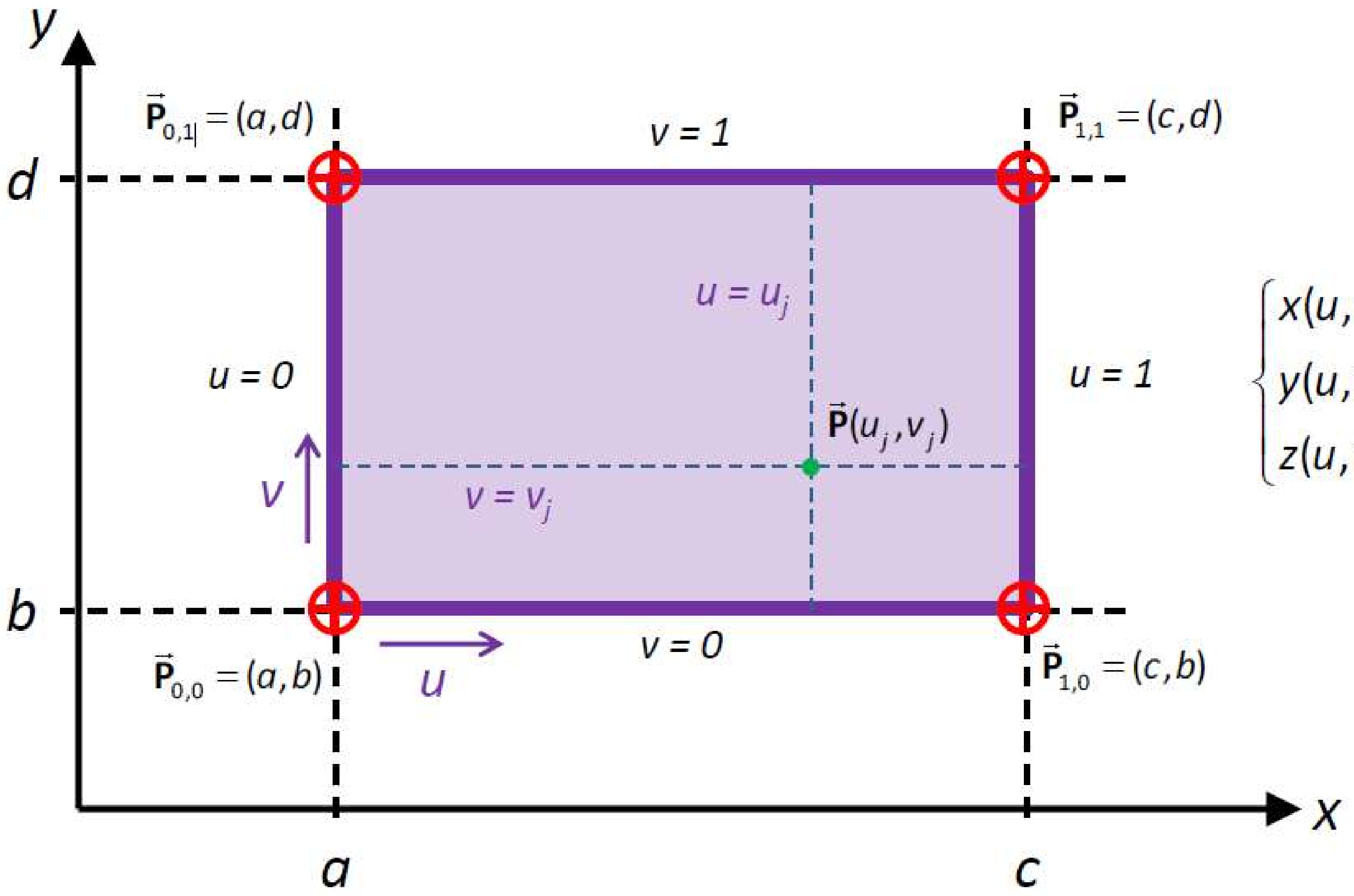


Surface

  - Pour une surface, deux paramètres sont nécessaires :
    - x = x (u,v) y = y(u,v) z = z(u,v)
- Caractéristiques générales
  - Les techniques de représentation sont des extensions des courbes paramétriques dans la seconde dimension v;
  - Les surfaces ainsi obtenues partagent beaucoup de caractéristiques avec les courbes correspondantes.

Représenation paramétrique

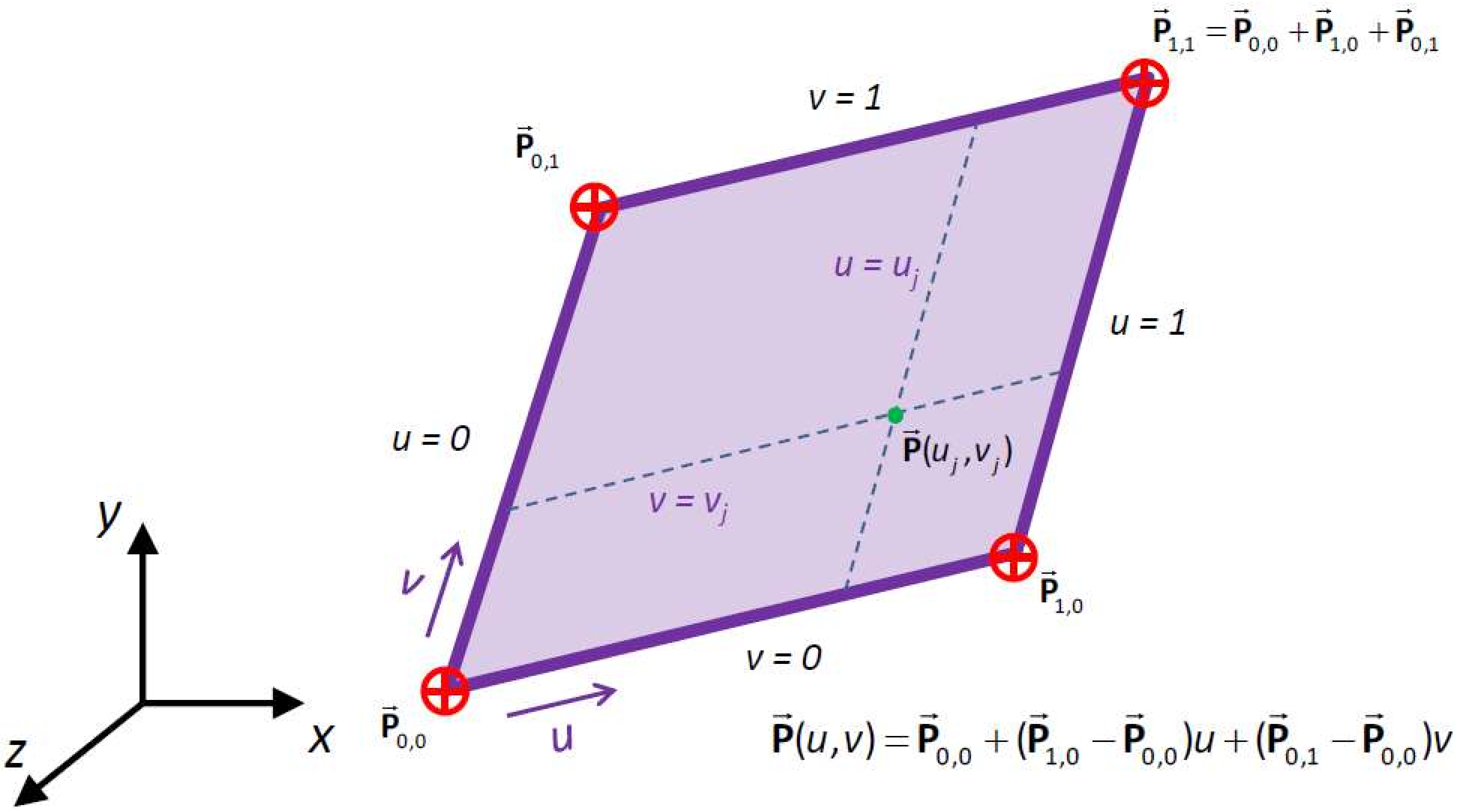
- Exemple simple: Carreau rectangulaire du plan XY…
  - Sommets $P_{0,0}$(a, b), $P_{1,0}$(c, b), $P_{1,1}$(c, d), $P_{0,1}$(a, d)…



$$\begin{cases} x(u,v) = a + (c-a)u \\ y(u,v) = b + (d-b)v \\ z(u,v) = 0 \end{cases}$$

Représentation paramétrique

- Exemple: Carreau planaire dans l'espace 3D…
  - Sommets $P_{0,0}$, $P_{1,0}$, $P_{1,1}$, $P_{0,1}$

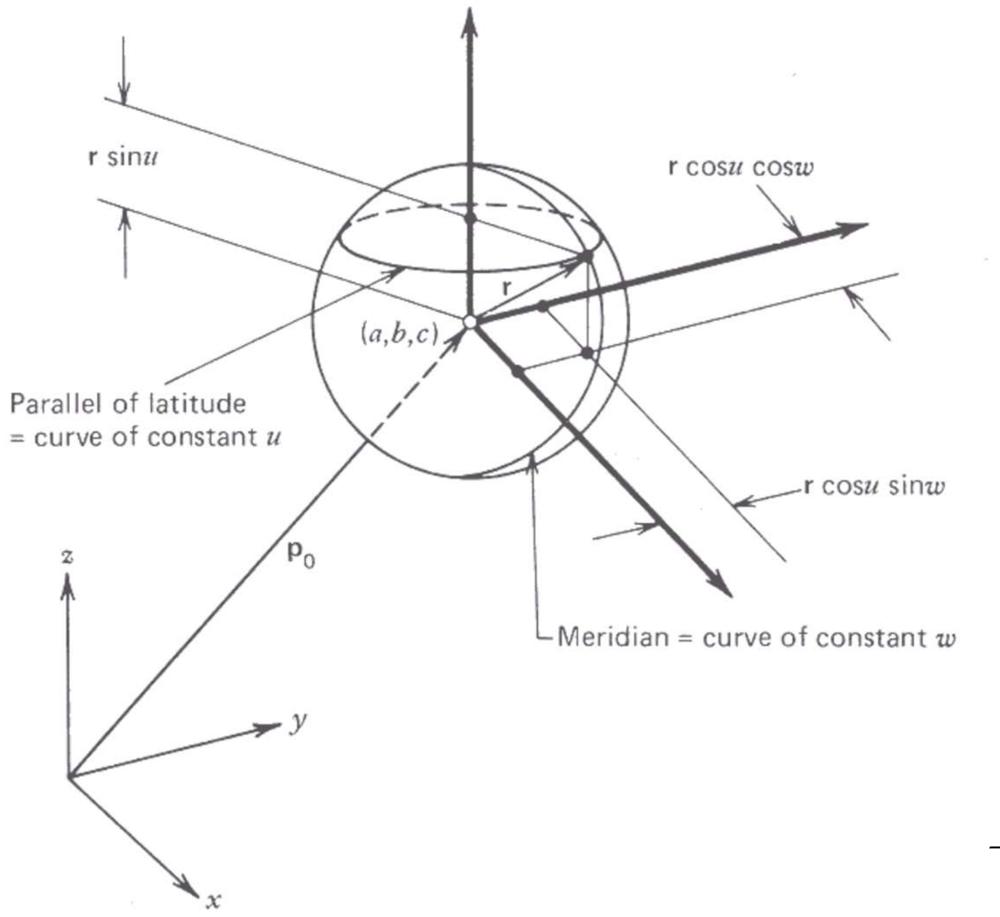


Représentation paramétrique

- Surface sphérique centrée en P0 = (x0, y0, z0):

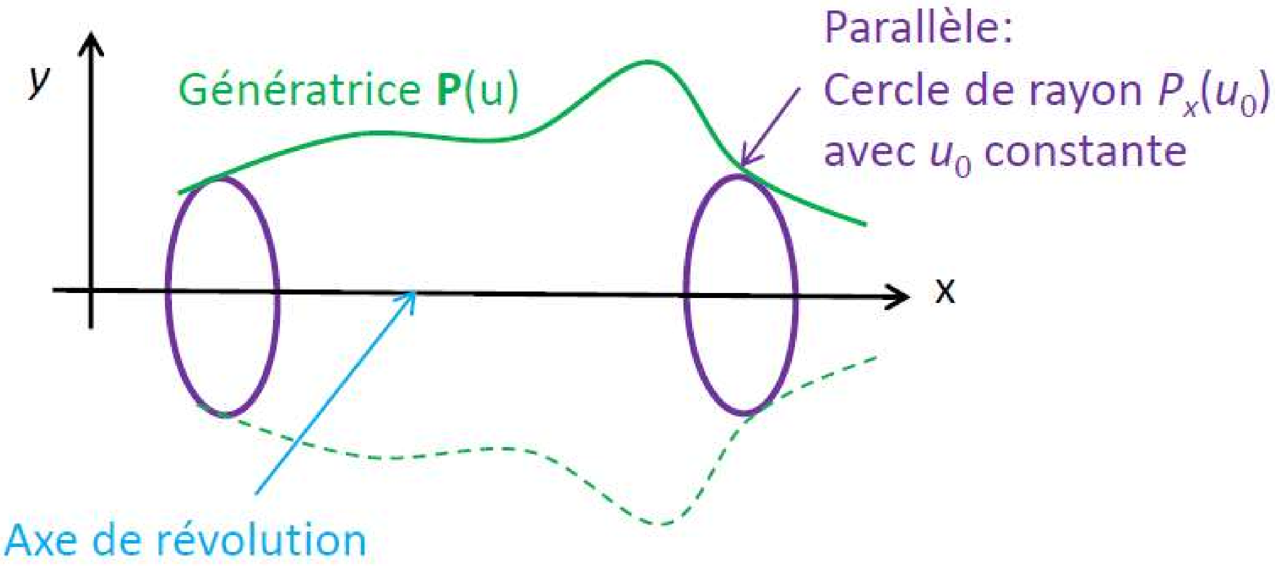
$$\vec{\mathbf{S}}(u,v)=\begin{cases} x(u,v)=x_0+r\cdot\cos(u)\cdot\cos(w) \\ y(u,v)=y_0+r\cdot\cos(u)\cdot\sin(w) \\ z(u,v)=z_0+r\cdot\sin(u) \end{cases} \quad ,u\in\left[-\frac{\pi}{2},\frac{\pi}{2}\right],w\in[0,2\pi]$$

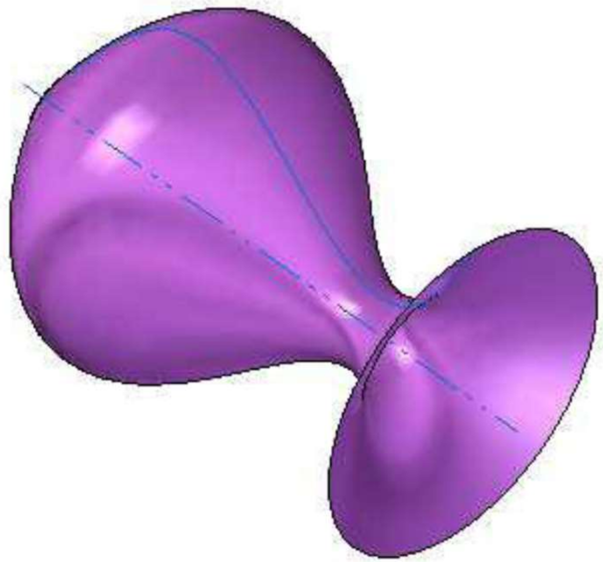
- Parallèles (latitude): courbes iso-paramétriques à u constant;
- Méridiens (longitude): courbes iso-paramétriques à w constant;



Surfaces balayées

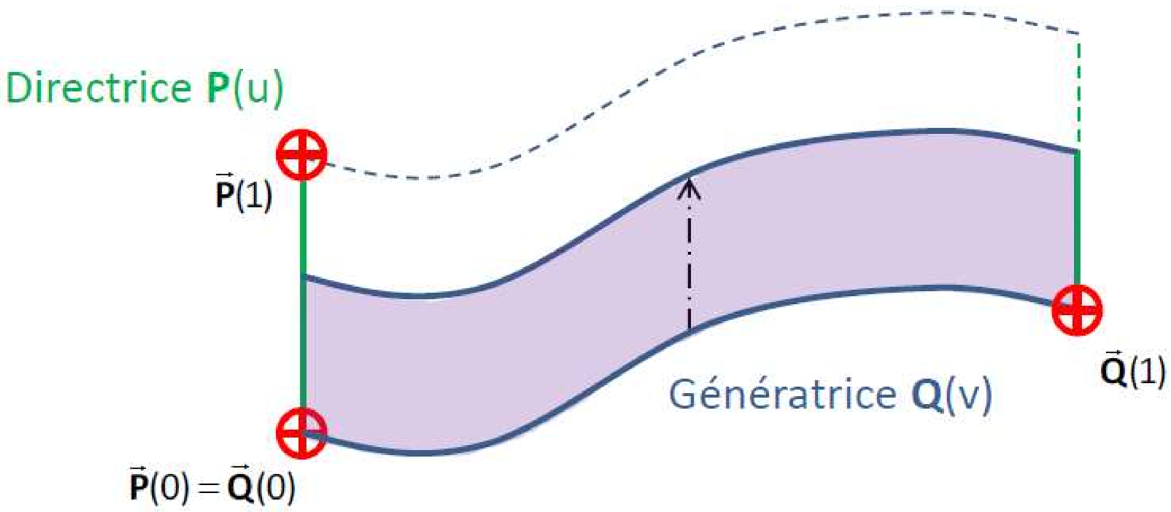
- Surface de révolution
  - Obtenue par révolution d'une courbe génératrice autour d'un axe de révolution;
  - Génératrice = courbe déplacée qui balaie la surface;
  - L'intersection d'un plan perpendiculaire à l'axe de révolution qui coupe la surface fournit un cercle nommé parallèle;

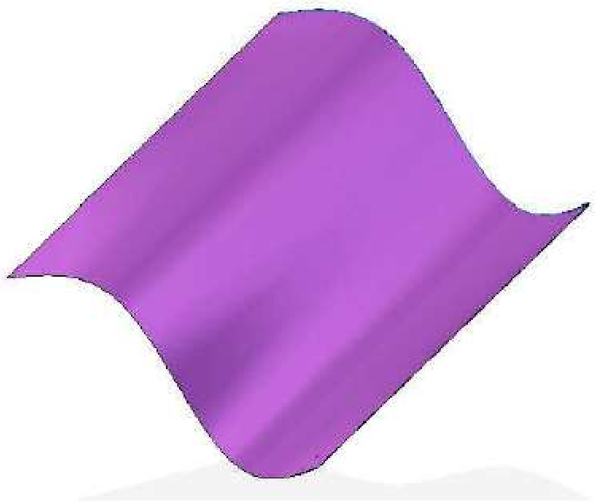




Surfaces balayées

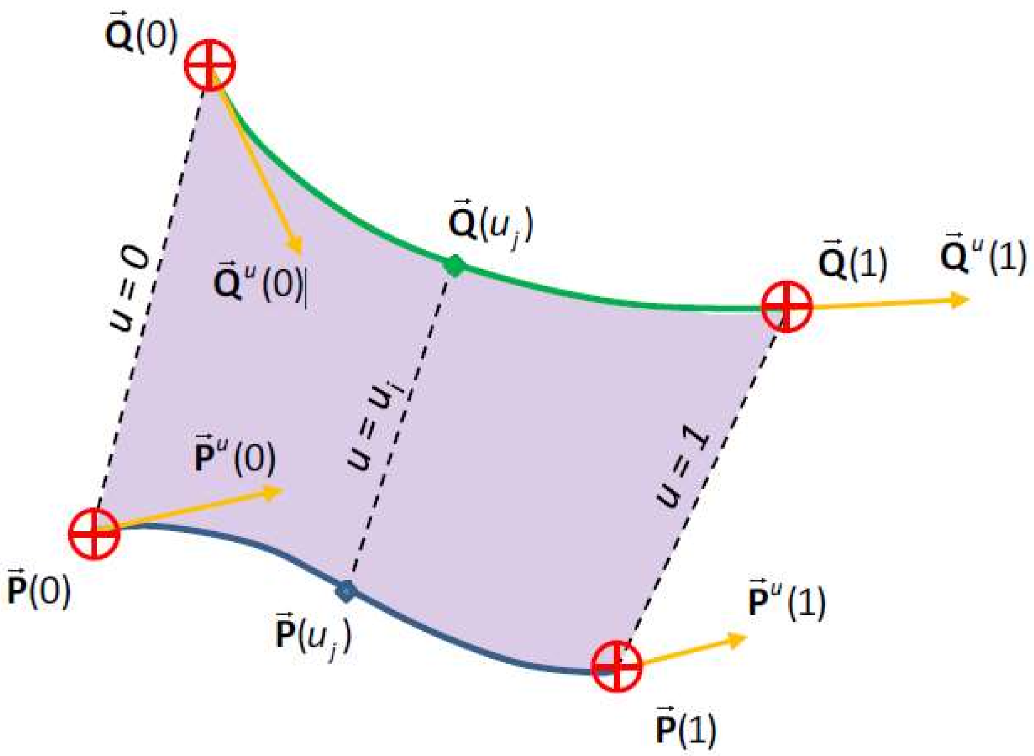
- Surface cylindrique
  - Créées par une droite directrice sur laquelle est translatée de manière parallèle une courbe génératrice.
    - Directrice = Guide ou trajectoire;
  - Si la génératrice est un cercle, on obtient un cylindre circulaire;
  - Extrusion = directrice droite (direction + distance) + profil générateur quelconque (esquisse);

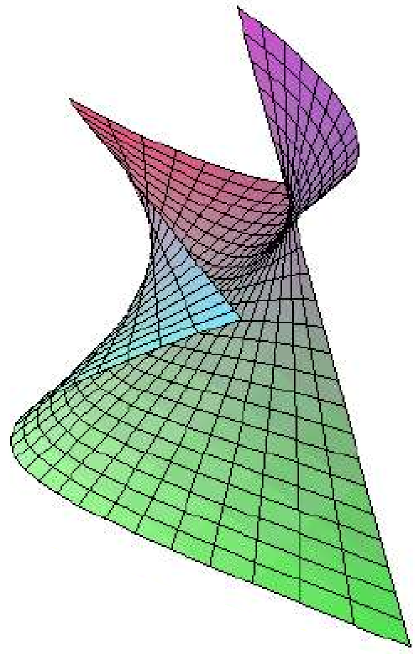




Surfaces balayées

- Surface réglée
  - Surface telle qu'en chaque point de la surface passe un segment de droite complètement contenu dans la surface;
  - Peut être obtenue par balayage d'un segment de droite (génératrice) qui se déplace entre deux courbes quelconques.

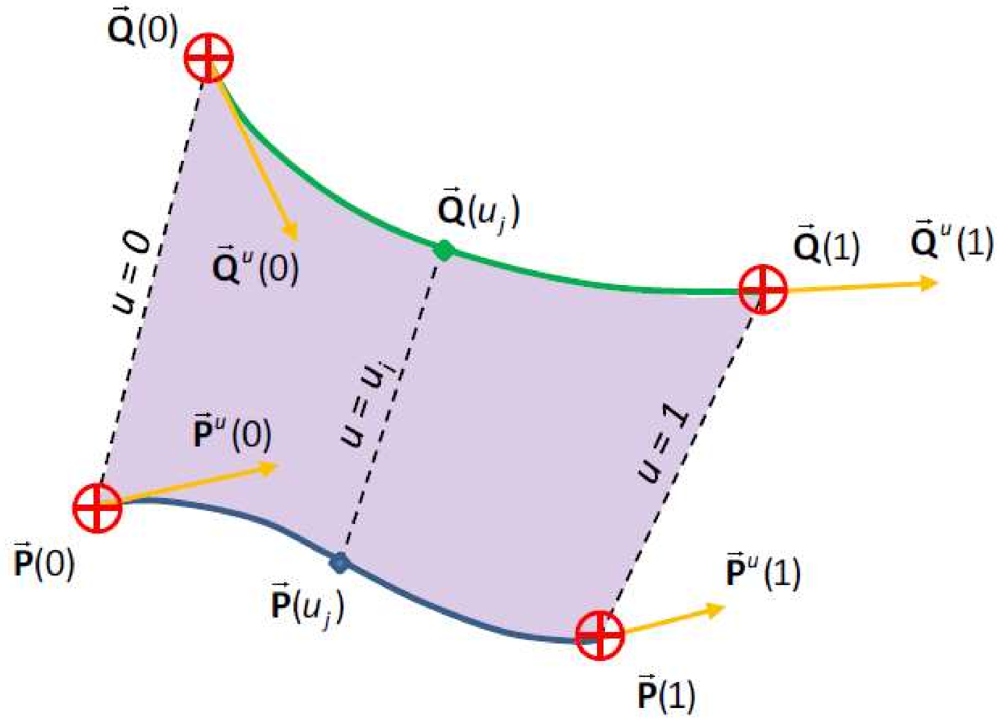




Surface balayée

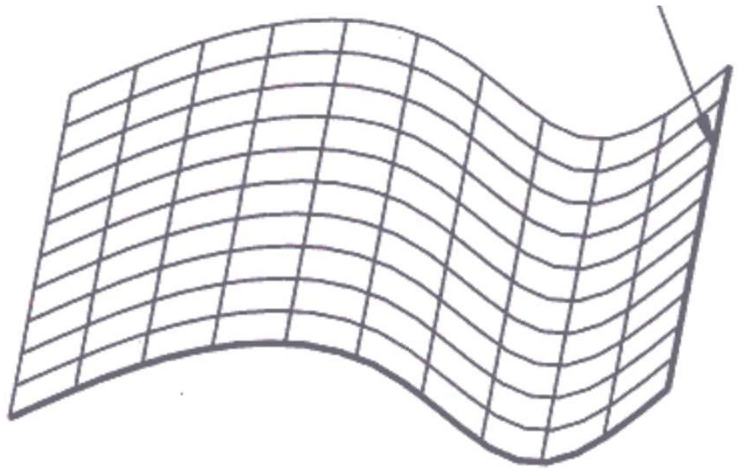
- Surface réglée (formulation mathématique):
  - Soit deux courbes P(u) et Q(u) définie dans l'espace 3D en fonction du même paramètre u variant de 0 a 1;
  - Si on a P(u) et Q(v), effectuer un changement de variable v = f(u);
  - Le principe revient à former un segment de droite entre tous les points évalués $P(u_i)$ et $Q(u_i)$:

$$S(u,v) = (1-v)P(u) + vQ(u)$$



Carreaux de surfaces

- Caractéristiques générales:
  - Élément de base dans la définition de surfaces complexes;
  - Équivalent aux segments pour la définition des courbes;
  - Un carreau est considéré bi-paramétrique puisqu'il est décrit par deux paramètres (u et v);
  - Pour un carreau, u et v varient habituellement de 0 à 1;
  - En fixant u ou v, on génère une courbe iso-paramétrique sur la surface définie en fonction du 2e paramètre;
  - Une surface est ainsi décrite par un réseau de courbes iso-paramétriques;
  - Ici, incrément de 0.1 en u et v.



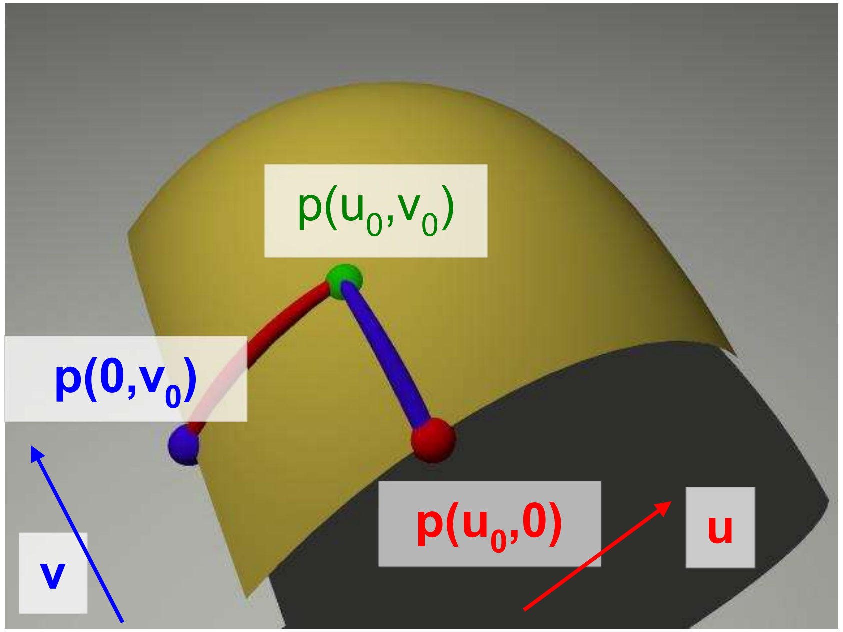
Définition générale

- Une surface paramétrique dans l'espace R^3 est définie par une fonction f :

$$\begin{array}{llll} f: & D\times E & \rightarrow & \mathbb{R}^3 \\ & u,v & \rightarrow & p(u,v)=\begin{cases} x(u,v)=f_x(u,v) \\ y(u,v)=f_y(u,v) \\ z(u,v)=f_z(u,v) \end{cases} \end{array}$$

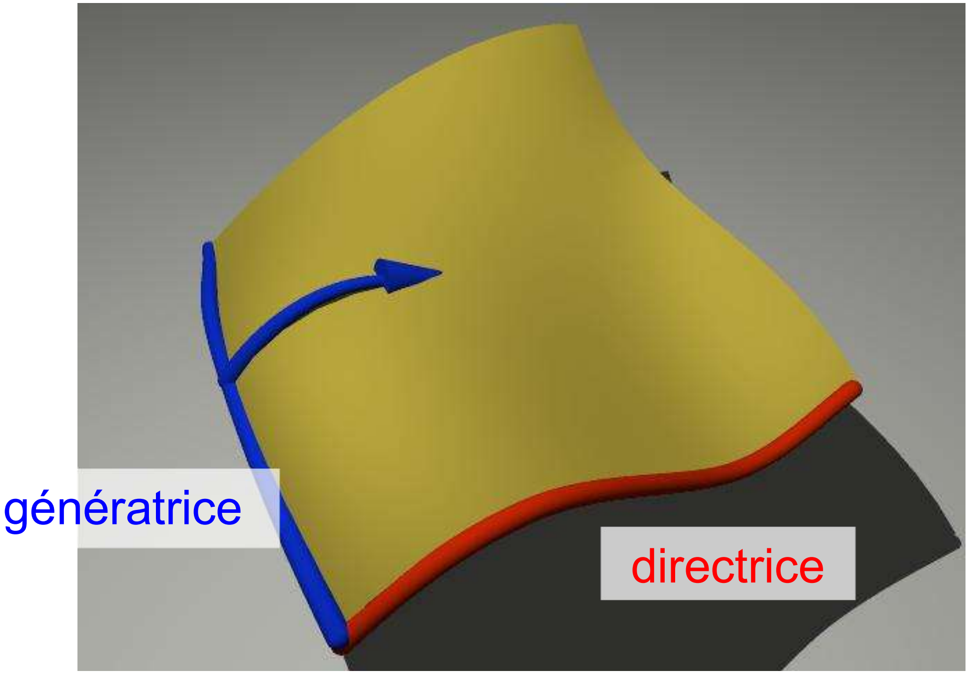
- Ainsi quand u parcourt D et v parcourt E, le point p(u,v) parcourt la surface

- Le point $p(u_0,v_0)$ est l'intersection entre 2 courbes **iso-paramétriques** : celle à **u** constant ($u=u_0$ en bleu) et celle à **v** constant ($v=v_0$ en rouge).



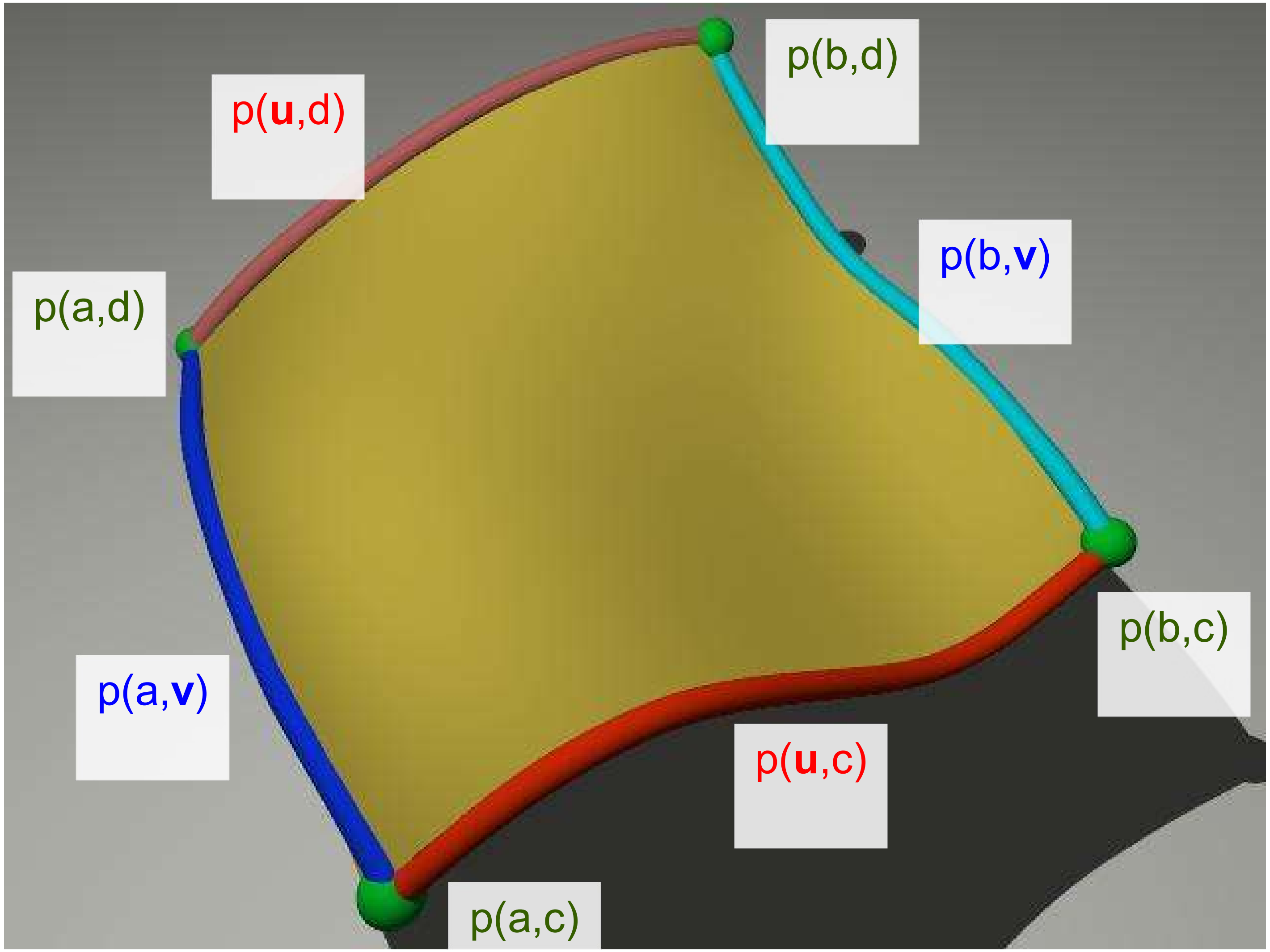
Produit tensoriel : principe

- Une façon de construire la surface paramétrique est de faire le produit tensoriel de deux courbes paramétriques. Une courbe $f_d(u)$ est appelée courbe directrice et l'autre courbe $f_g(v)$ est appelée courbe génératrice.
- La surface est obtenue en **déplaçant** et **déformant** la courbe génératrice le long de la courbe directrice.



Coins et bords

- Soient un (u,v) dans [a,b]x[c,d]

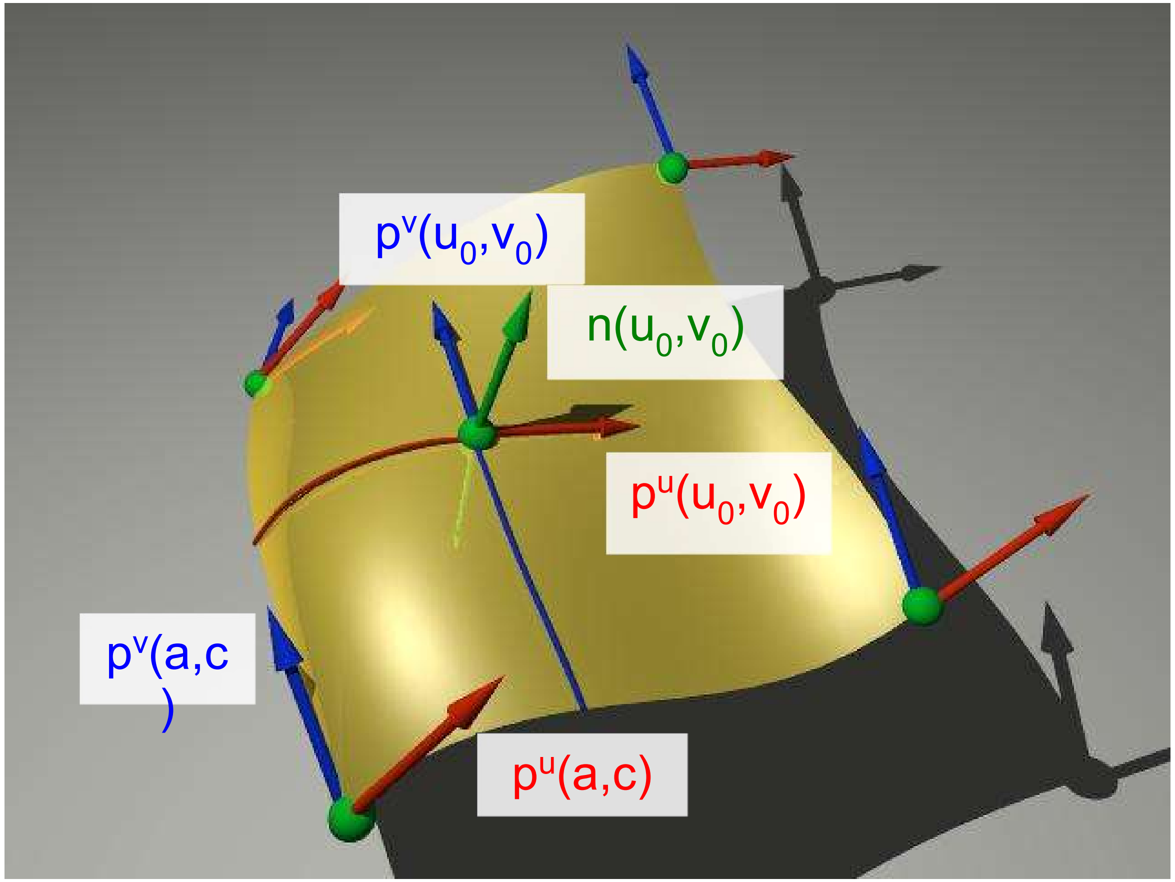


Tangentes et normales

- Le plan tangent est défini par les vecteurs tangentes $p^u(u_0,v_0)$ et $p^v(u_0,v_0)$ aux deux courbes iso-paramétriques passant par le point $p(u_0,v_0)$ considéré.
- La normale est donnée par le produit vectoriel des tangentes

La normale unitaire est donnée par :

$$n(u_0,v_0)=\frac{p^u(u_0,v_0)\times p^v(u_0,v_0)}{\|p^u(u_0,v_0)\times p^v(u_0,v_0)\|}$$



Carreau bi-cubique

- Un carreau bi-cubique est obtenu en faisant le produit tensoriel de fonctions polynomiales de degrés 3 (l'une suivant le paramètre u et l'autre suivant le paramètre v) :

$$p(u,v)=\sum_{i=0}^{3}\sum_{j=0}^{3} a_{ij}\,u^i v^j \quad , \qquad a_{ij}\in\mathbb{R}$$

$$p(u,v)=a_{00}+a_{01}v+a_{02}v^2+a_{03}v^3+a_{10}u+a_{11}uv+a_{12}uv^2+a_{13}uv^3+\ldots+\ldots+a_{33}u^3v^3$$

- Ceci nous amène à la formulation matricielle suivante :

$$p(u,v)=U\,AV^T=\begin{bmatrix}u^3 & u^2 & u & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}a_{33} & a_{32} & a_{31} & a_{30}\\ a_{23} & a_{22} & a_{21} & a_{20}\\ a_{13} & a_{12} & a_{11} & a_{10}\\ a_{03} & a_{02} & a_{01} & a_{00}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}v^3\\ v^2\\ v\\ 1\end{bmatrix}$$

Comme pour les courbes cubiques, le contrôle de la forme de la surface par les coefficients a_{ij} n'est absolument pas intuitif => forme d'Hermite

Carreau bi-cubique d'Hermite

- La forme bi-cubique d'Hermite se dérive de l'expression utilisée pour les courbes d'Hermite :

$$p(u,v) = F(u)\,B\,F(v)^T \quad , \qquad (u,v) \in [0,1]^2$$

avec $F(u) = [F_1(u), F_2(u), F_3(u), F_4(u)]$

$F(v) = [F_1(v), F_2(v), F_3(v), F_4(v)]$

voir le cours sur les courbes d'Hermite pour l'expression des $F_i(u)$

$$B = \begin{bmatrix} p_{00} & p_{01} & p^v_{00} & p^v_{01} \\ p_{10} & p_{11} & p^v_{10} & p^v_{11} \\ p^u_{00} & p^u_{01} & p^{uv}_{00} & p^{uv}_{01} \\ p^u_{10} & p^u_{11} & p^{uv}_{10} & p^{uv}_{11} \end{bmatrix}$$

Carreaux de Bézier : maillage de contrôle

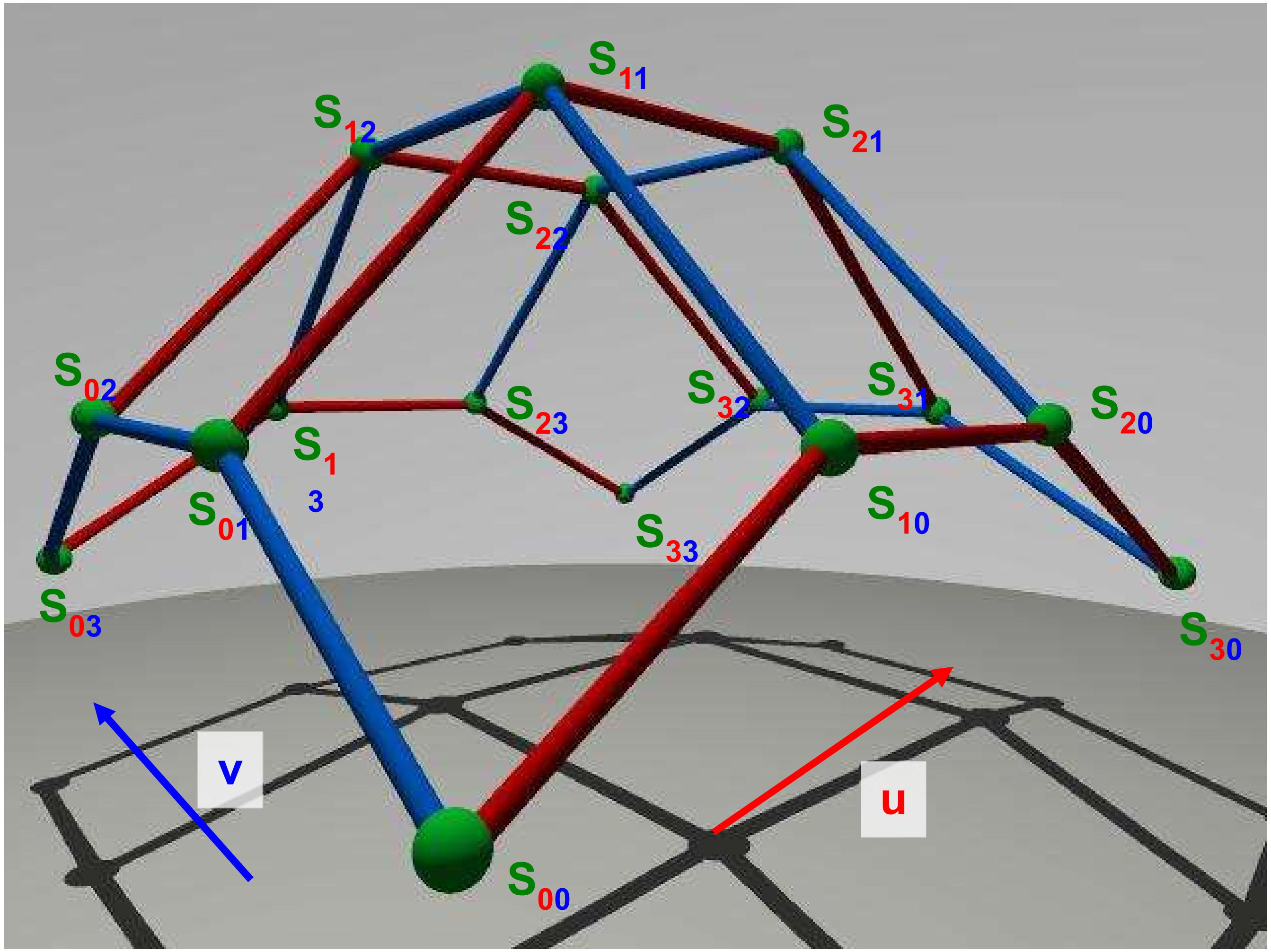
- $(u, v) \in [0,1]^2$

- La surface est contrôlée à partir d'un maillage régulier composé de quadrilatères

- Les points de contrôles sont les sommets S_{ij} du maillage et il sont numérotés dans les directions de u et de v

  – Les **(n+1)** points de contrôle en **u** donnent le degré **n** des courbes en u. Ici n = 3.

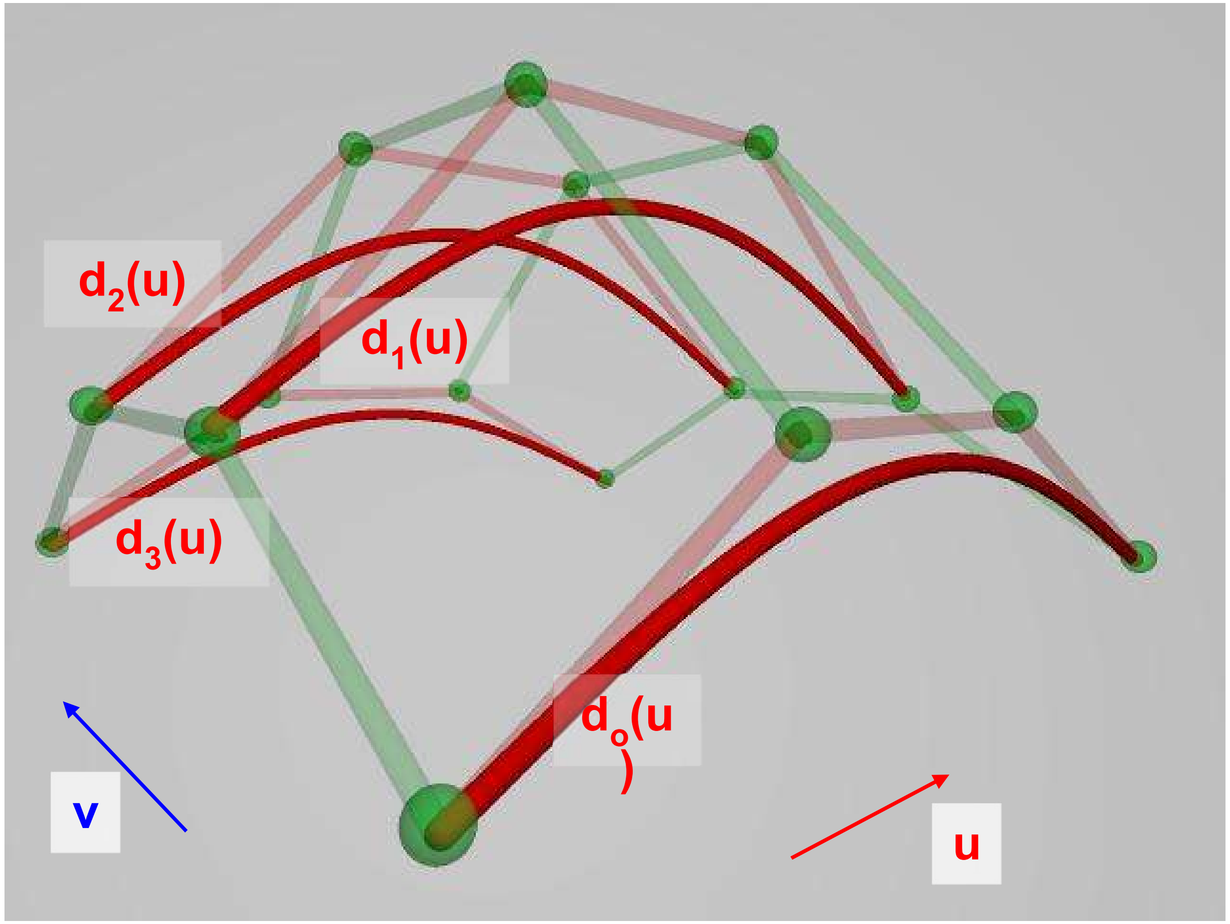
  – Les **(m+1)** points de contrôle en **v** donnent le degré **m** des courbes en v. Ici m = 3.



Carreaux de Bézier : produit tensoriel

- Pour évaluer un point $p(u_0,v_0)$ sur la courbe, on effectue un produit tensoriel :
  - Si nous choisissons les directrices dans la direction de **u**
    - Il y a une directrice $d_j(u)$, $(j=0..m)$ par polygone de contrôle dans la direction des u
    - Le polygone de contrôle de la directrice $d_j(u)$ est défini par les points de contrôle S_{ij} $(i=0..n)$
    - Une directrice est une courbe de Bézier définie par :

$$d_j(u) = \sum_{i=0}^{n} B_i^n(u) S_{ij}$$



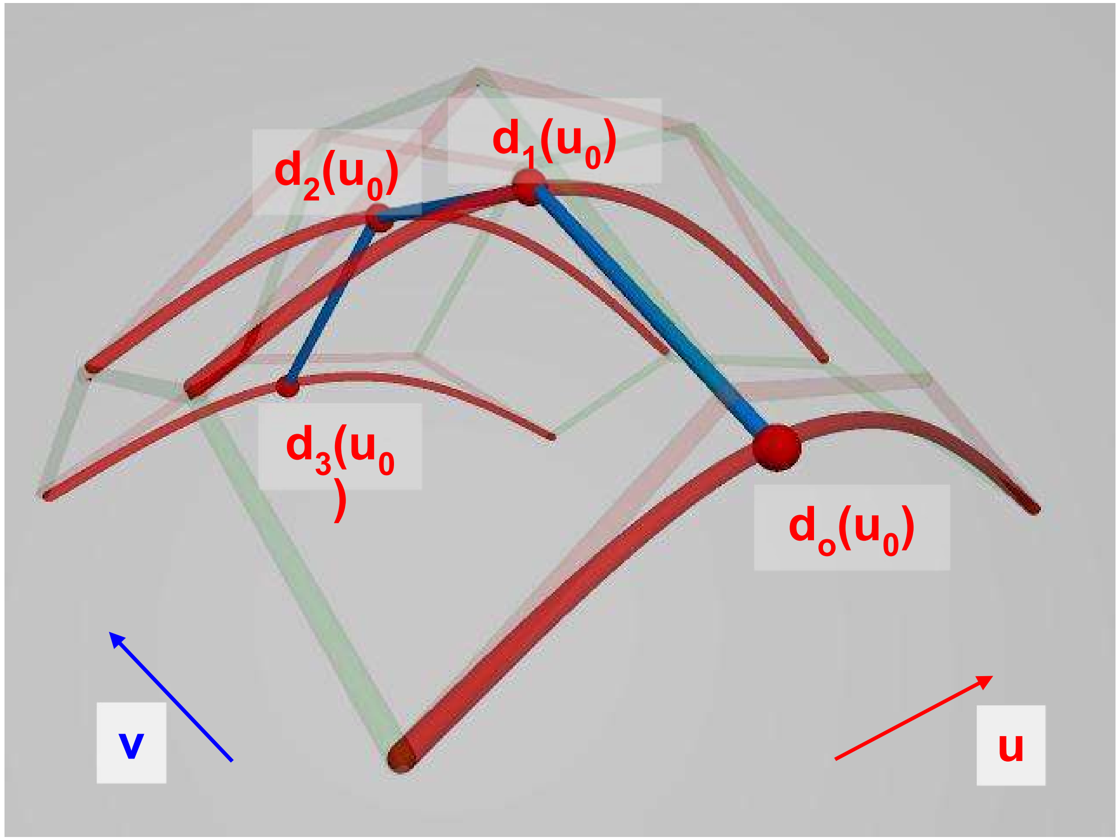
Carreaux de Bézier : produit tensoriel

- Pour chaque directrice (en rouge), on évalue le point $d_j(u_0)$:

$$d_j(u_0) = \sum_{i=0}^{n} B_i^n(u_0) S_{ij}, j = 0, \dots, m$$

- Les $d_j(u_0)$ sont les sommets du polygone de contrôle (en bleu) de la courbe génératrice g(v) :

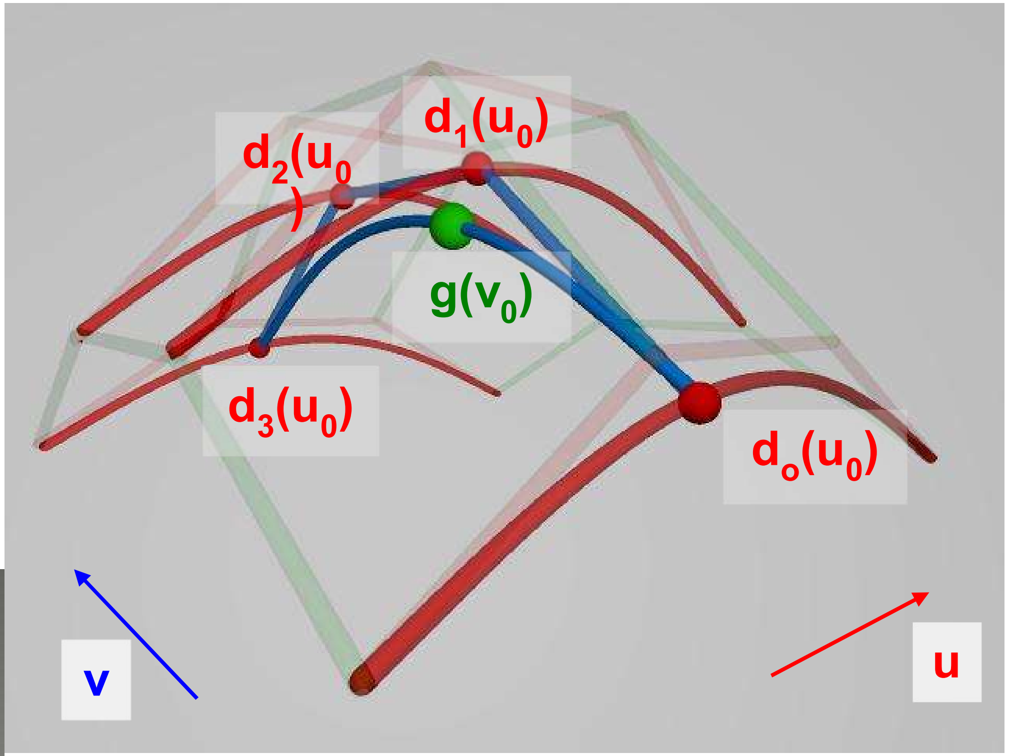
$$g(v) = \sum_{j=0}^{m} B_j^m(v) d_j(u_0)$$

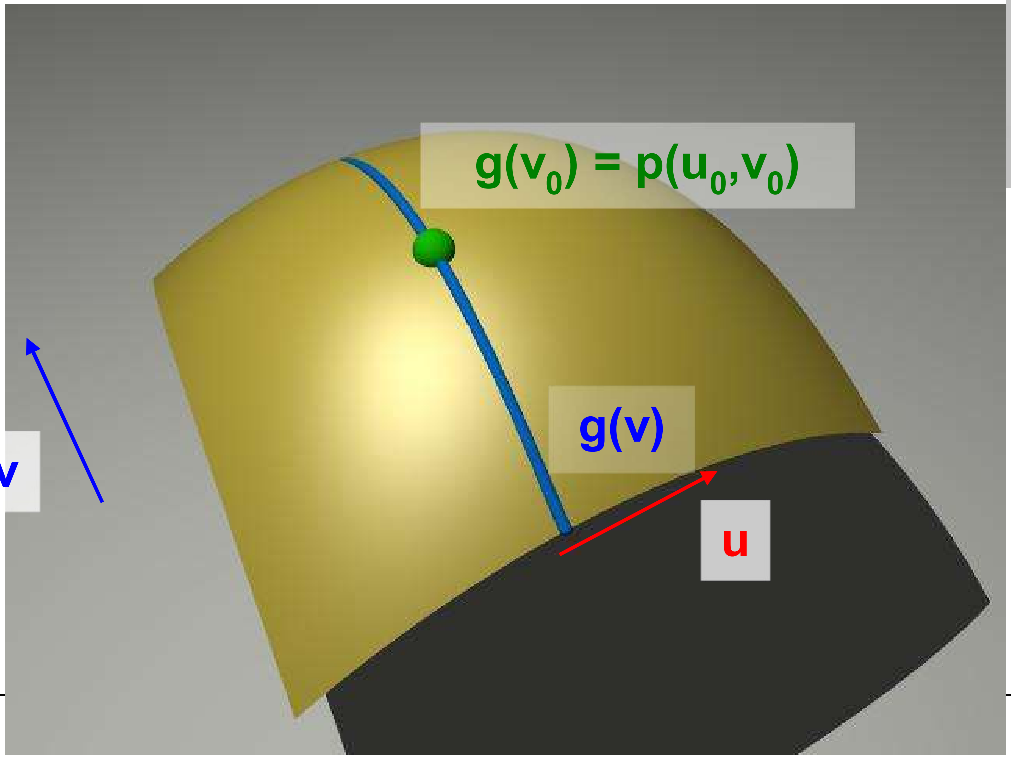


Carreaux de Bézier : produit tensoriel

- La génératrice est sur la surface et le point de la surface $p(u_0,v_0)$ est alors celui de la courbe génératrice $g(v)$ en $v=v_0$

$$g(v_0) = \sum_{j=0}^{m} B_j^m(v_0) d_j(u_0)$$





En reportant l'équation des $d_j(u)$ dans l'équation de $g(v)$, on obtient l'équation du carreau de Bézier :

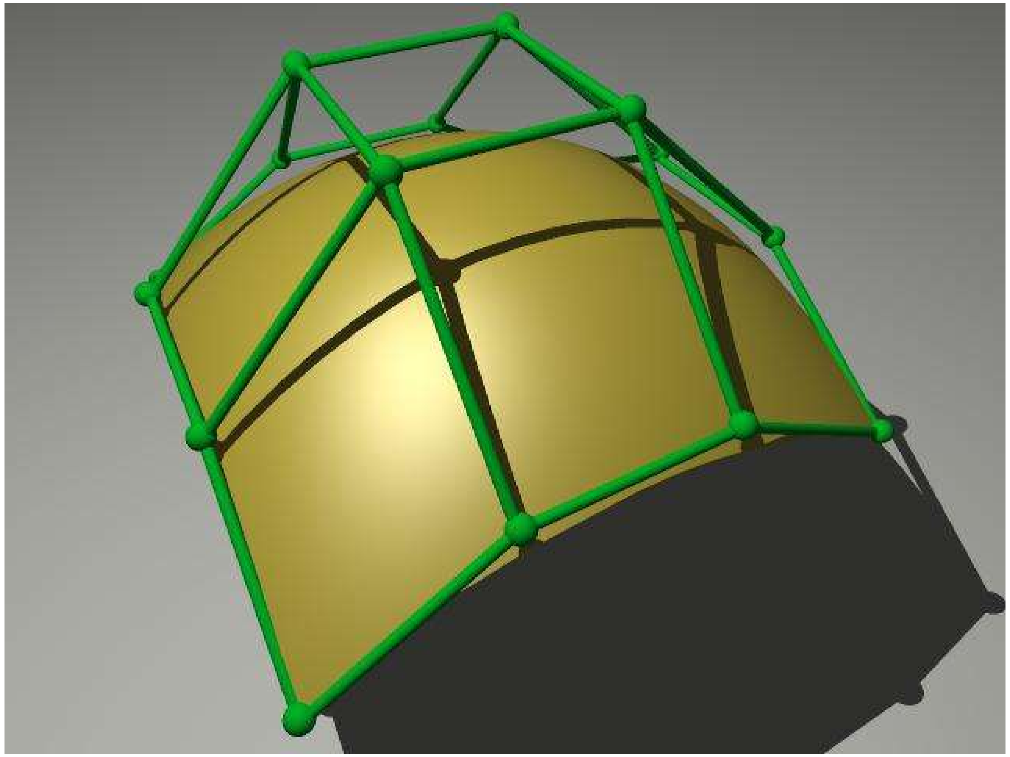
$$p(u,v) = \sum_{i=0}^{n} \sum_{j=0}^{m} B_i^n(u) B_j^m(v) S_{ij}$$

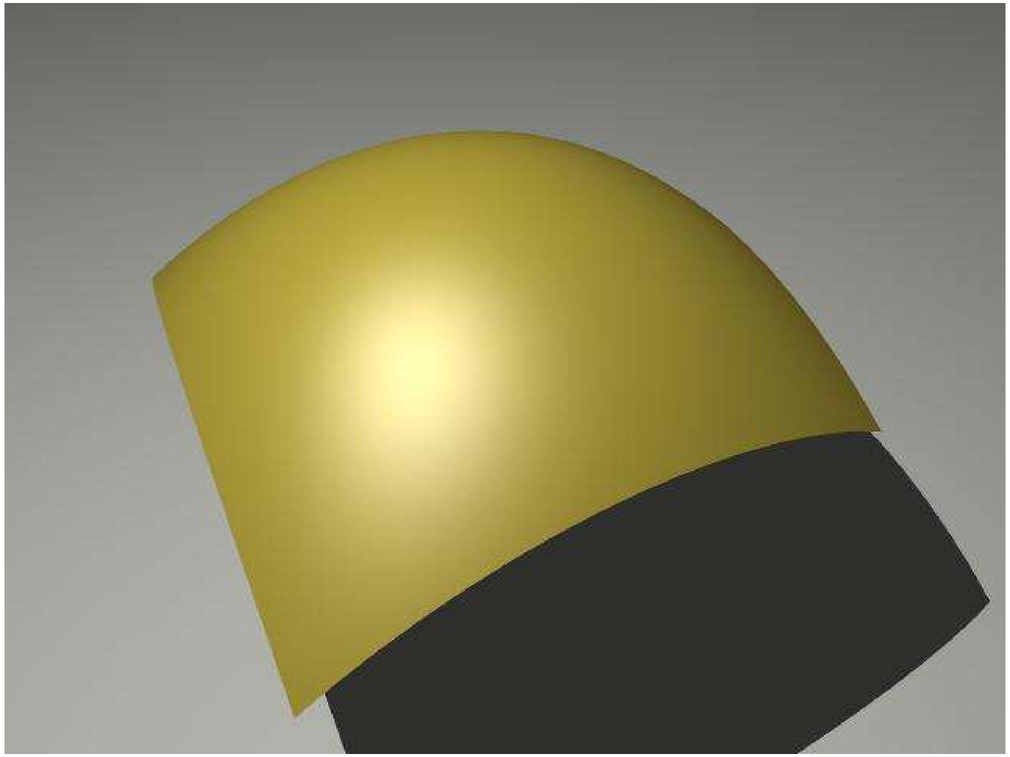
Carreaux de Bézier : définition

- Un carreau de Bézier est défini à partir d'un maillage de contrôle et des polynômes de Bernstein de la façon suivante :

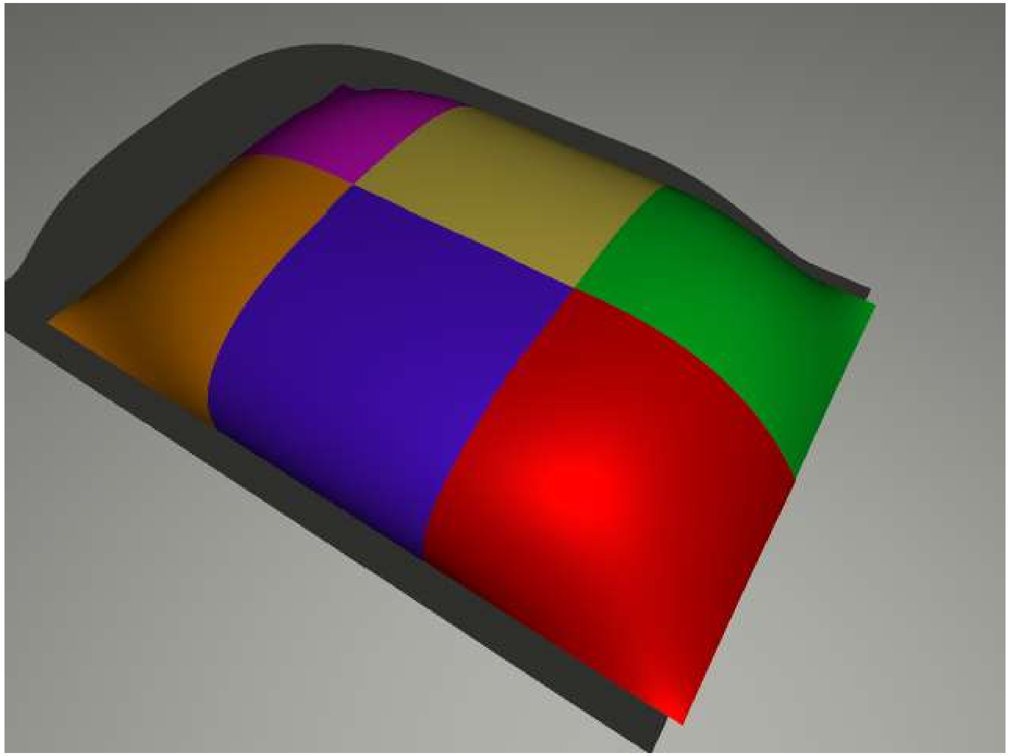
$$\mathrm{p}(u,v) = \sum_{i=0}^{n} \sum_{j=0}^{m} B_i^n(u) B_j^m(v) S_{ij}$$

Exemple de carreau bi-cubique = produit tensoriel de deux courbes de degré 3 (ordre 4)

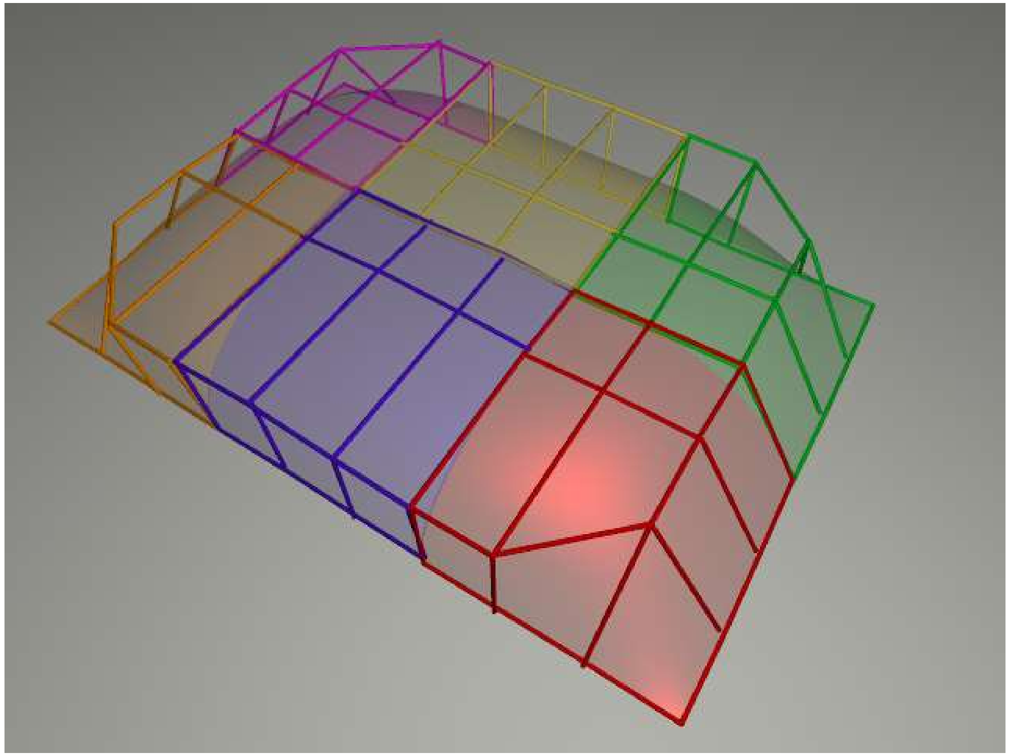




Modélisation par carreaux



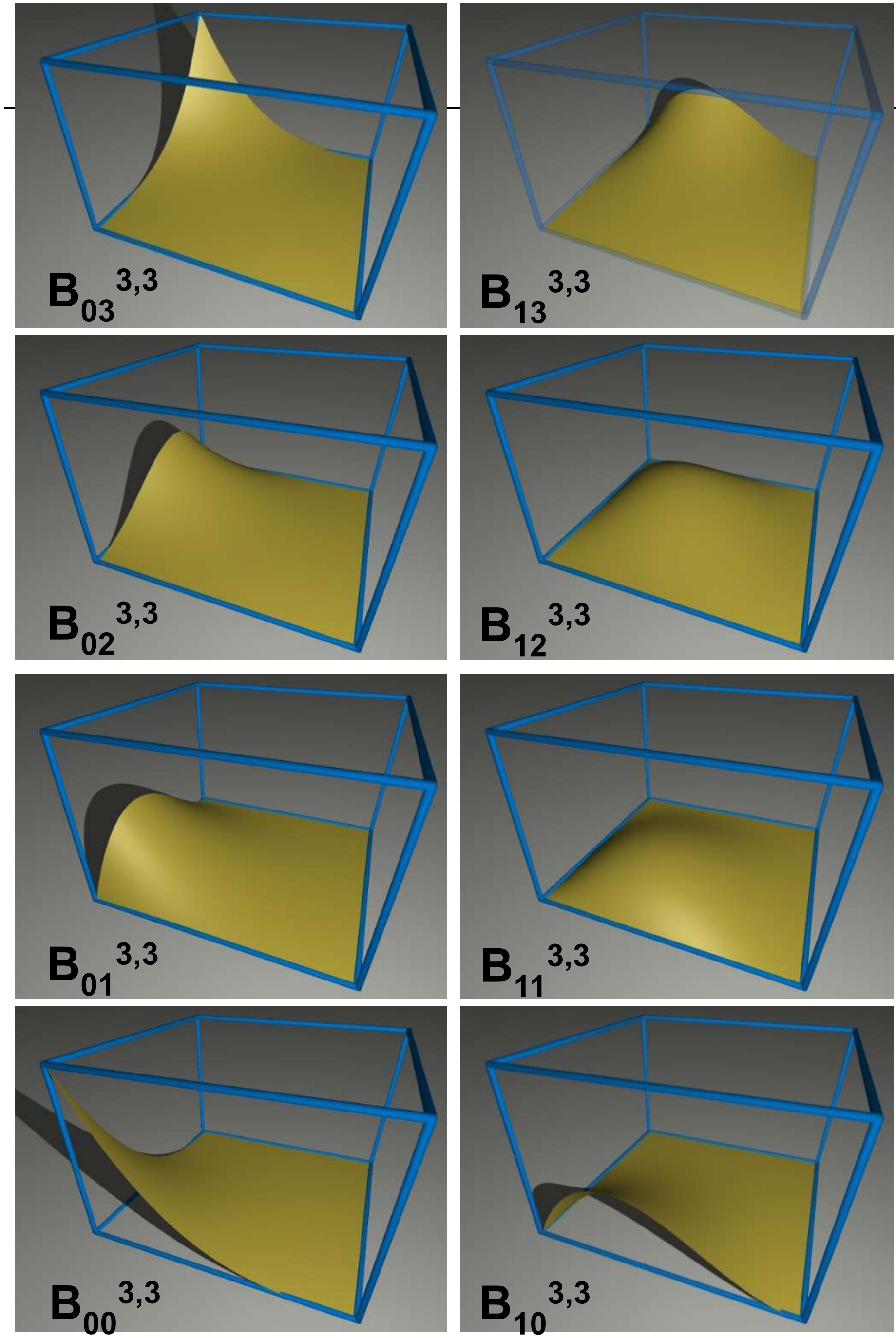
- C'est une modélisation type couture. On joint les carreaux les uns aux autres en jouant sur la position des points de contrôles



Les fonctions de base

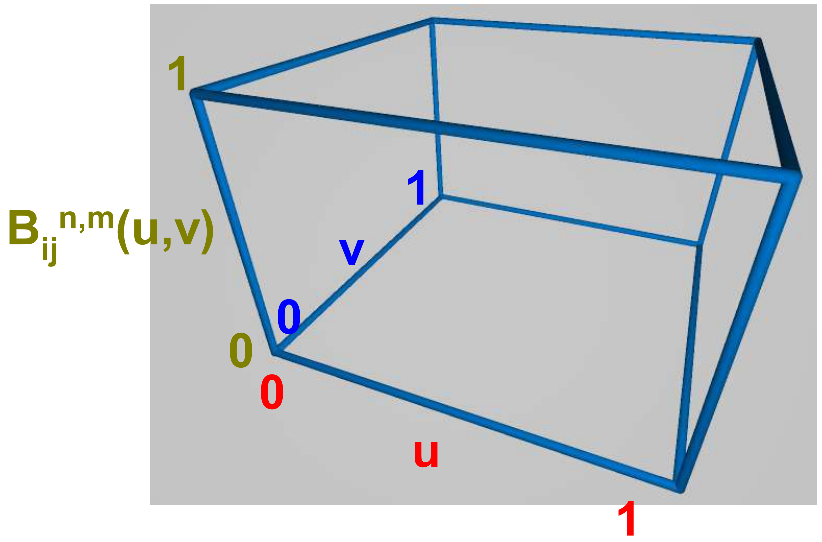
- Les carreaux de Bézier sont construits par produit tensoriel de courbes de Bézier.
- Néanmoins, il est important de bien voir qu'ils sont obtenus par combinaison barycentrique de leurs points de contrôle :

$$p(u,v)=\sum_{i=0,\,j=0}^{n,\,m} B_{ij}^{n,\,m}(u,v)\,S_{ij} \quad , \qquad (u,v)\in[0,1]^2$$



Fonctions de base pour un carreau de Bézier bi-cubique

- Les 8 autres fonctions de base $B_{2j}^{3,3}$ et $B_{3j}^{3,3}$ sont obtenues par symétrie.

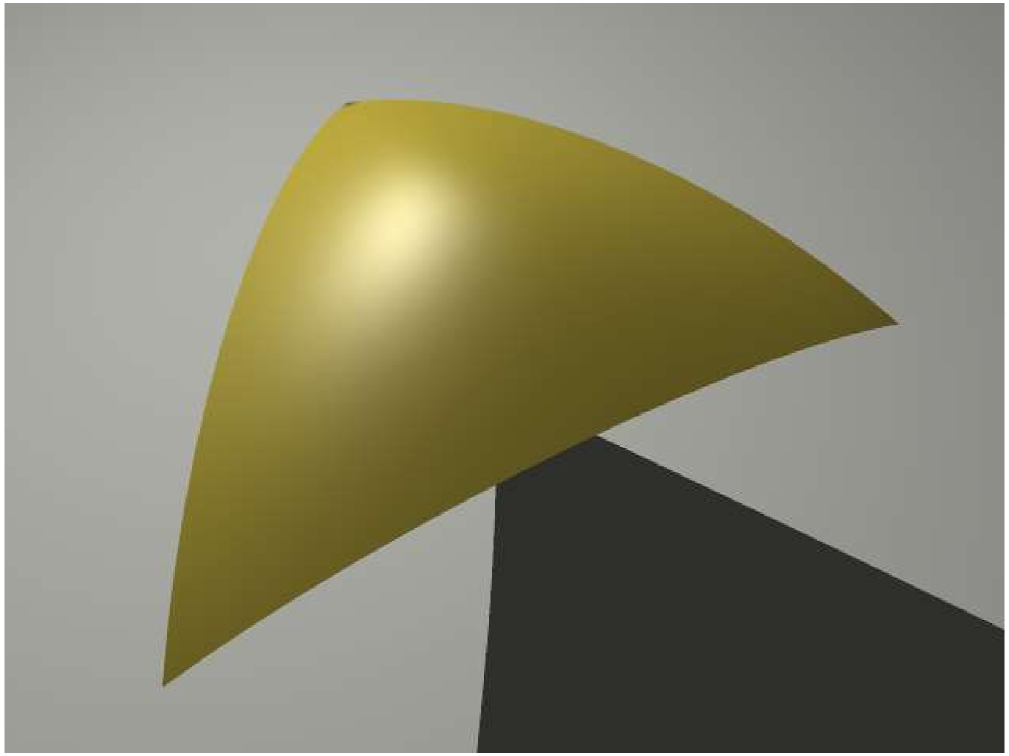


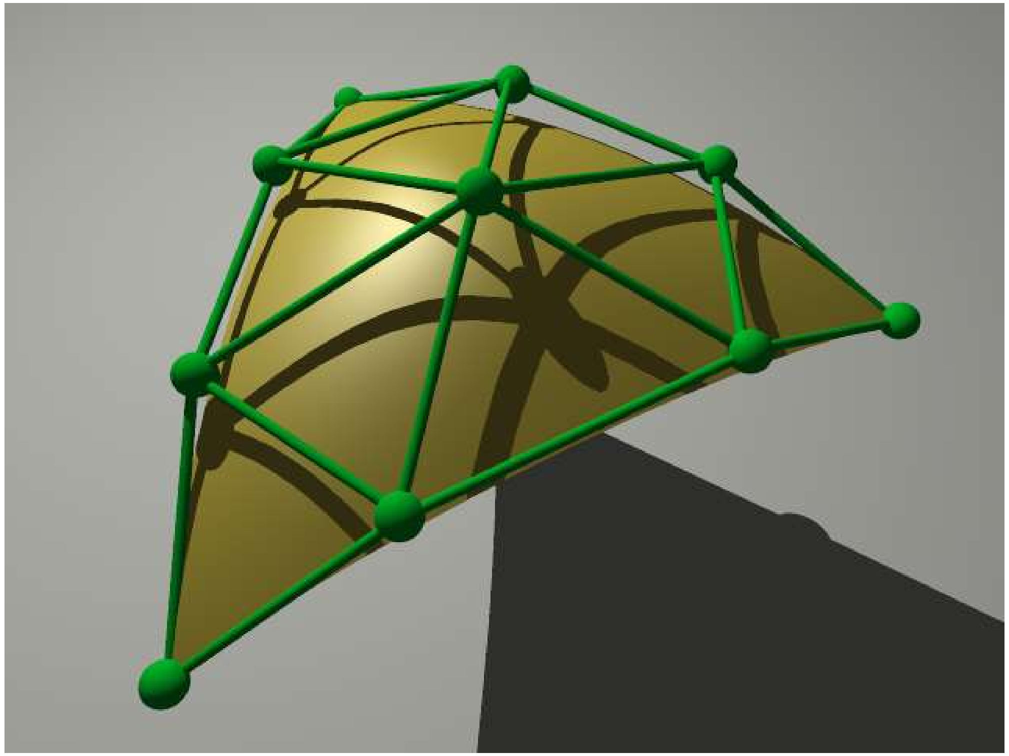
Carreaux triangulaires de Bézier

- Un carreau de Bézier triangulaire de degré **n** s 'écrit de la façon suivante :

$$p(u,v)=\sum_{i+j+k=n} B^n_{ijk}(u,v)\,S_{ijk}$$

Exemple de carreau triangulaire de Bézier de degré 3





Carreaux triangulaires de Bézier

- Pour définir un carreau triangulaire, on utilise les coordonnées barycentriques dans le triangle.
  - Le polynôme de Bernstein est donné par l'équation :

$$B_{ijk}^{n}(u,v)=\frac{n!}{i!\,j!\,k!}u^{i}v^{j}w^{k} \quad , \qquad i+j+k=n$$

où u,v et w sont les coordonnées barycentrique du point dans le triangle :

$$u\geqslant 0 \quad , \qquad v\geqslant 0 \quad , \qquad w\geqslant 0$$

$$w=1-u-v$$

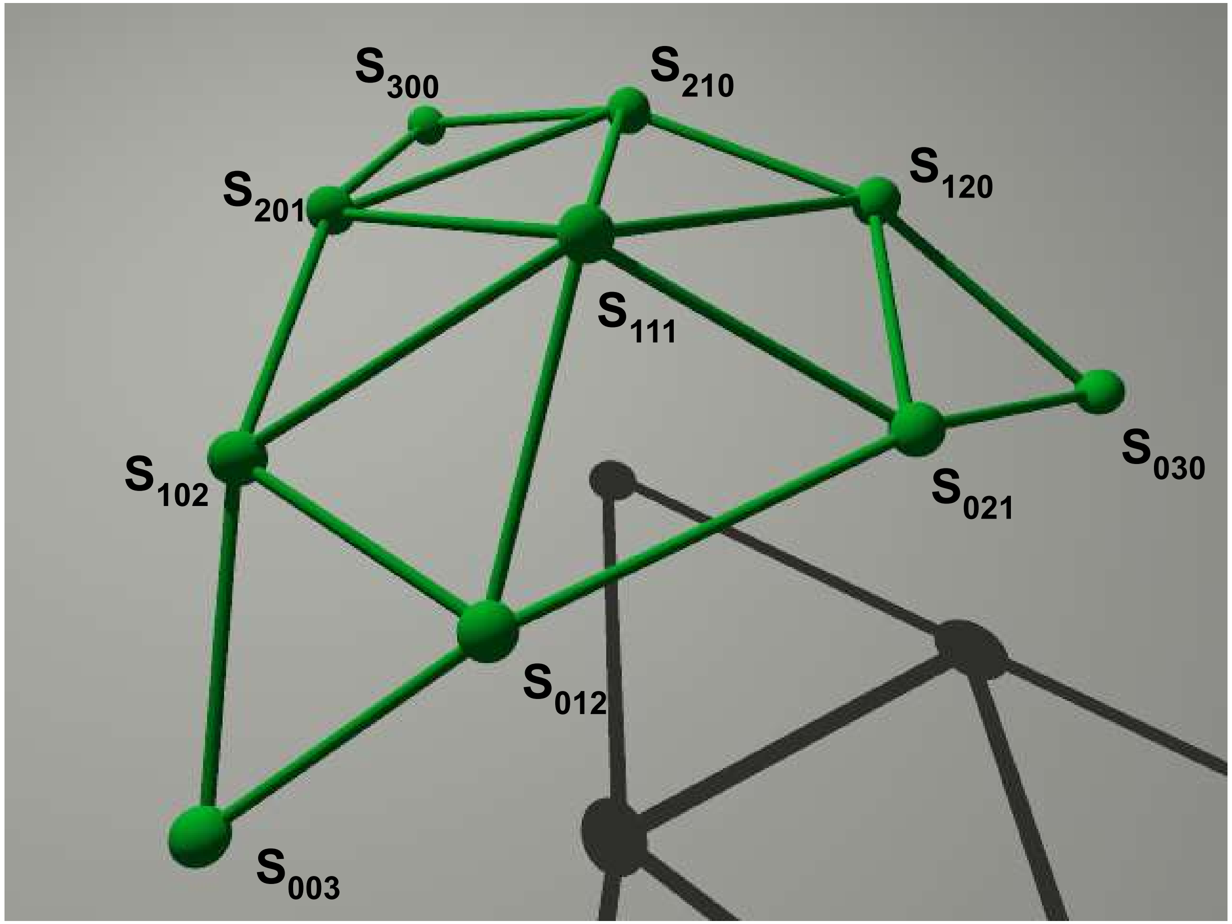
- Les B_{ijk}^{n} (u,v) sont les fonctions de base. Comme pour les courbes de Bézier et pour les carreaux de Bézier, chaque fonction de base est associée à un point de contrôle S_{ijk}.

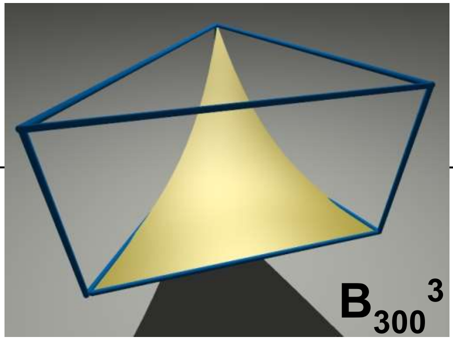
Un point de coordonnées paramétriques (u,v) sur le carreau triangulaire est obtenu par combinaison affine (barycentrique) des point de contrôle pondérés par leur fonction de base.

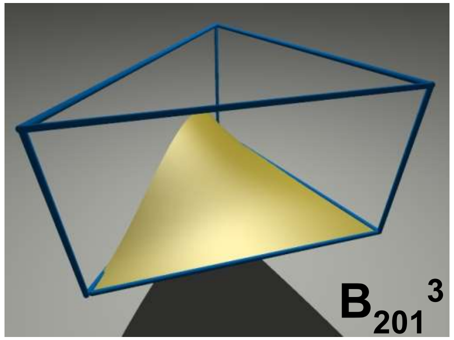
Carreaux triangulaires de Bézier

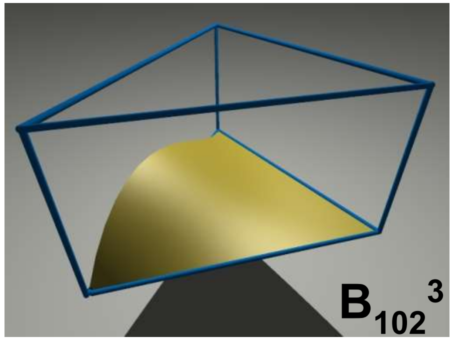
- Ce qui nous donne :

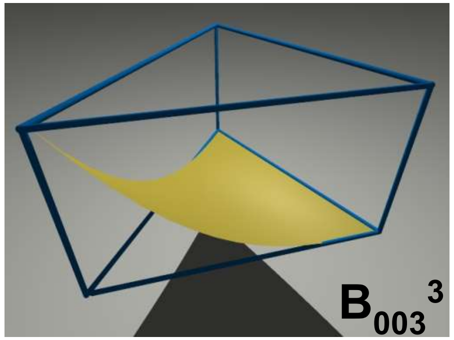
$$p(u,v)=\sum_{i+j+k=n}\frac{n!}{i!\,j!\,k!}u^i v^j w^k S_{ijk}\ ,\qquad i+j+k=1\ ,\quad w=1-u-v$$

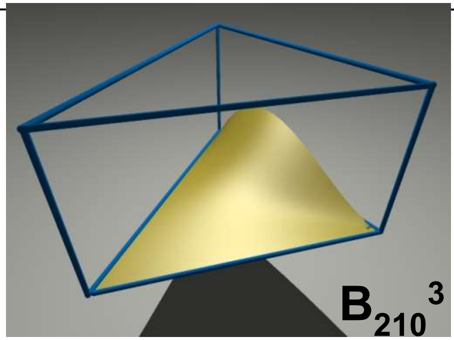


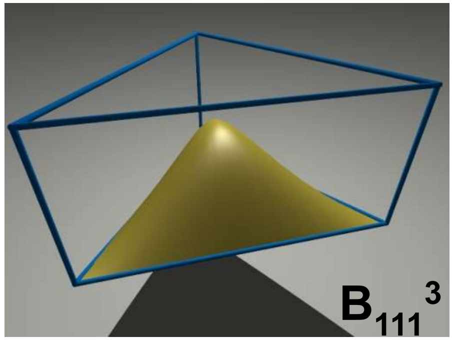


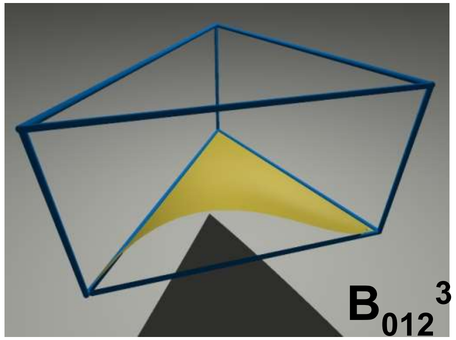


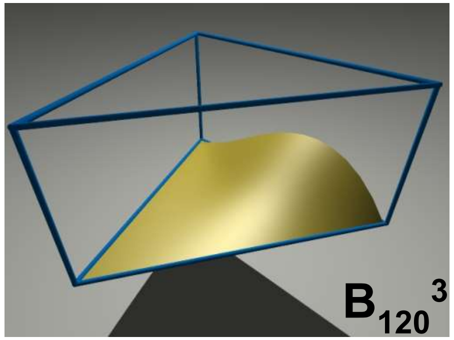


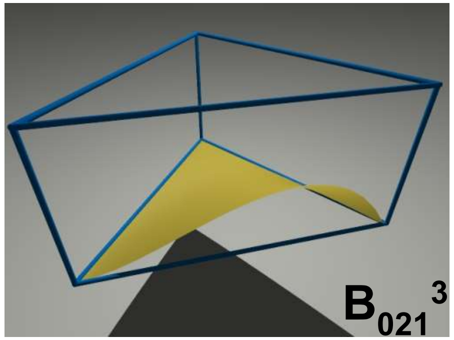


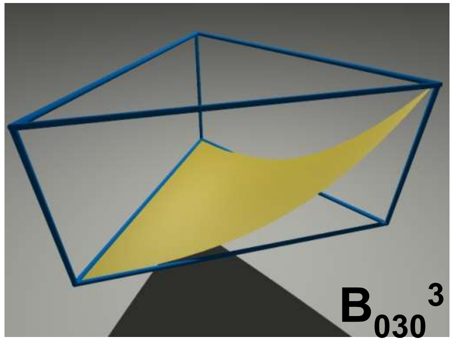








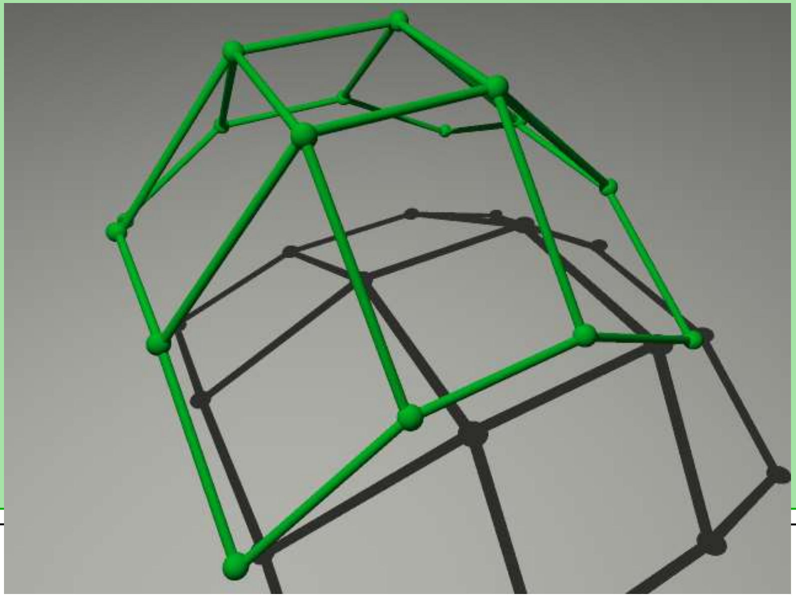




Fonctions de base d'un triangle de Bézier cubique

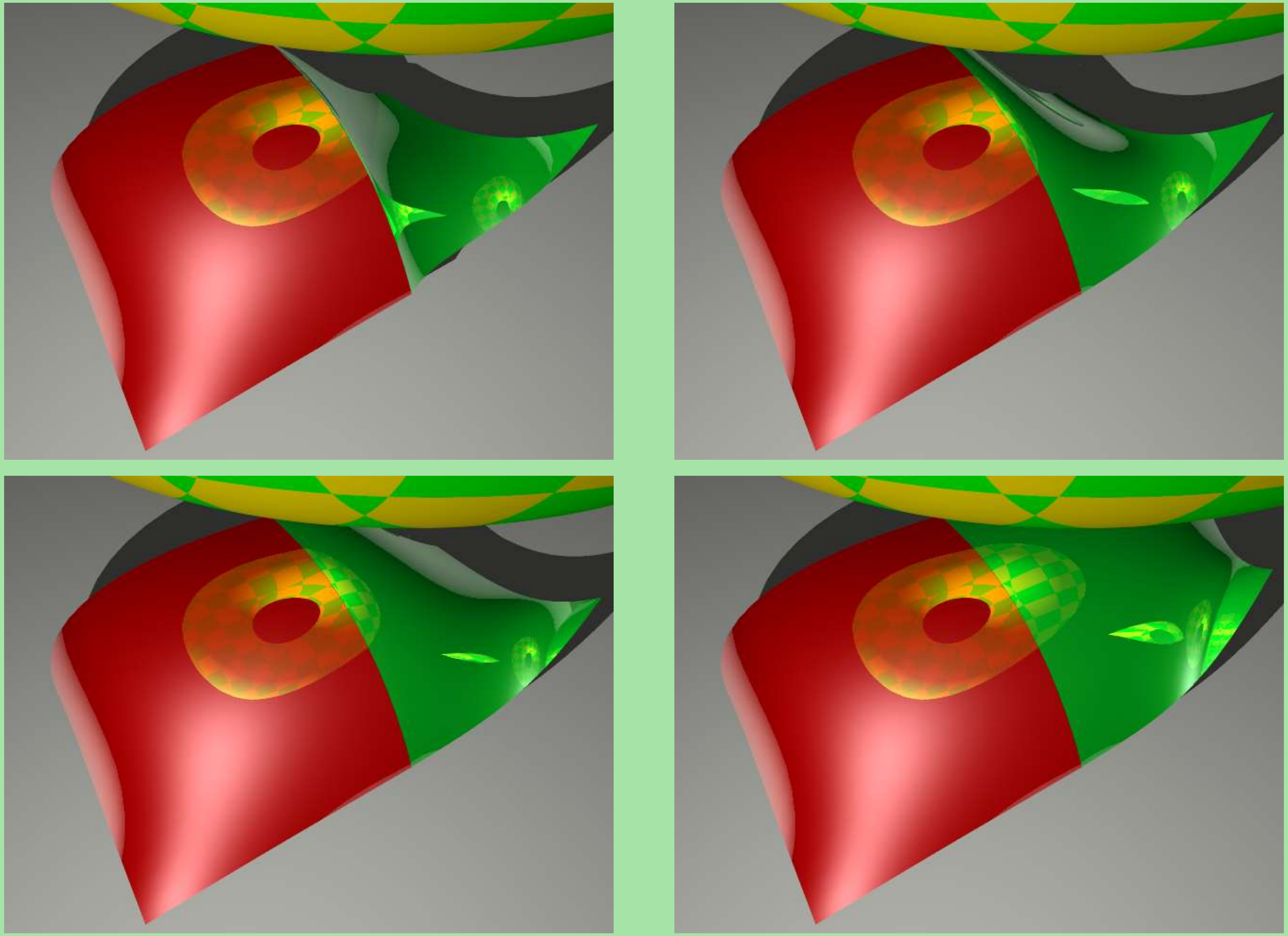
Exercices

- Reprendre le processus du produit tensoriel en choisissant les directrices dans la direction du paramètre v.
- Montrer que le point $p(u_0,v_0)$ obtenu est le même que celui calculé en prenant les directrices dans la direction du paramètre u.
- Utiliser l'algorithme de De Casteljau pour dessiner le point p(0.25,0.25) à partir du polygone de contrôle suivant :
- Essayer de deviner comment l'algorithme de De Casteljau peut s'appliquer en 2D en travaillant sur les faces du polygone de contrôle



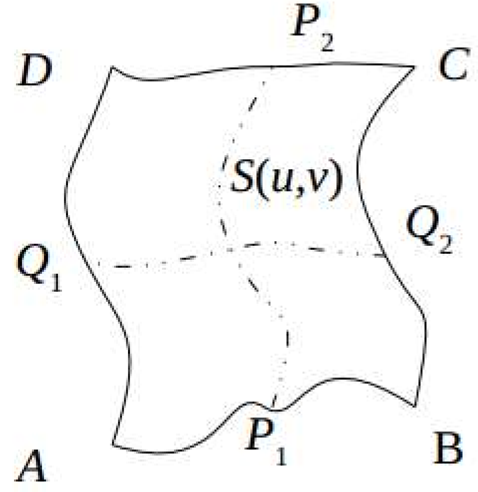
Exercices sur la continuité

- D'après vous, quelles contraintes doit-on appliquer aux polygones de contrôles pour que deux carreaux joignent avec une :
  - Continuité C^0 ?
  - Continuité G^1 ?
  - Continuité C^1 ?
  - Continuité C^2 ?



Patches de coons bilinéaires

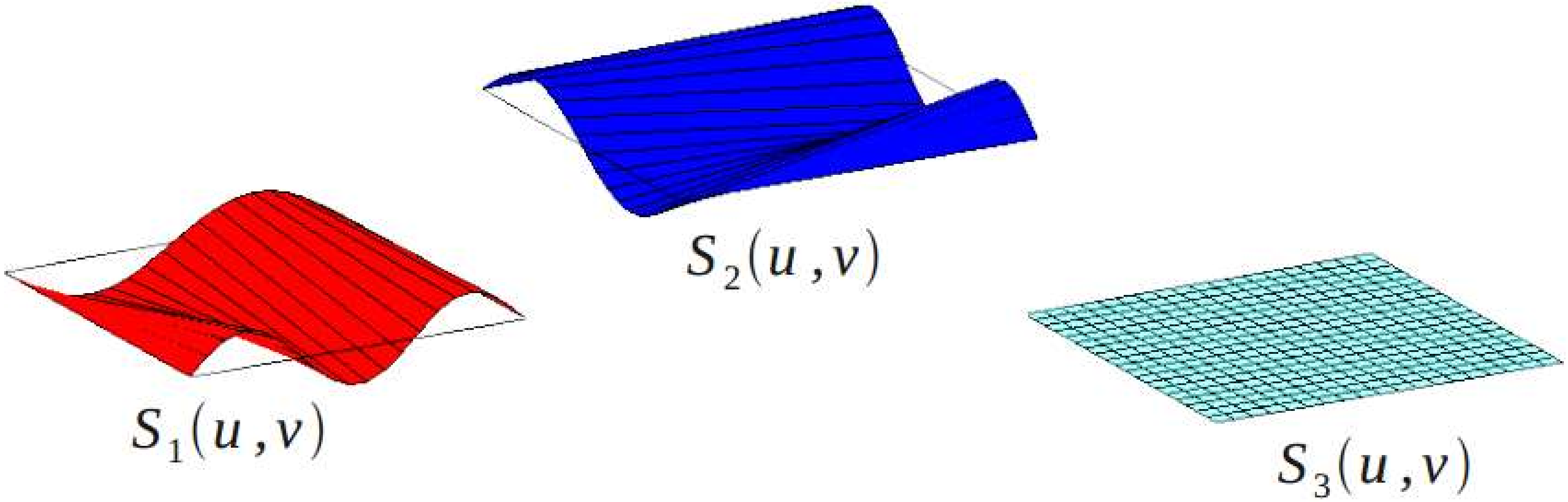
- Patch de Coons bilinéaire
  - Steven Anson Coons – (travaux publiés en 1967 mais issus de travaux durant WWII dans l'aéronautique)
  - Soit 4 courbes paramétrées (Bézier ou B-Splines ou autres) se rencontrant en 4 points (A,B,C,D) :
    - $P_1(u)$, $P_2(u)$, $Q_1(v)$, $Q_2(v)$ tels que
      $P_1(0)=A=Q_1(0)$ $\quad$ $P_1(1)=B=Q_2(0)$
      $Q_2(1)=C=P_2(1)$ $\quad$ $Q_1(1)=D=P_2(0)$
  - La surface $S(u,v)$ est portée par ces 4 courbes



Patches de coons bilinéaires

- On définit 3 surfaces réglées par interpolation linéaire:

$$S_1(u,v)=(1-v)P_1(u)+vP_2(u)$$
$$S_2(u,v)=(1-u)Q_1(v)+uQ_2(v)$$
$$S_3(u,v)=(1-u)(1-v)A+u(1-v)B+v(1-u)D+uvC$$

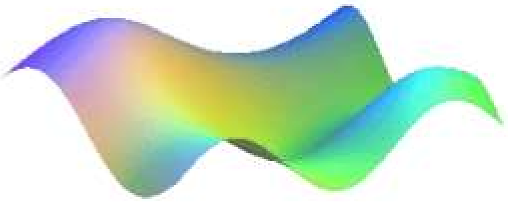


Patches de coons bilinéaires

- Le patch bilinéaire de Coons est défini par :

$$S(u,v) = S_1(u,v) + S_2(u,v) - S_3(u,v)$$

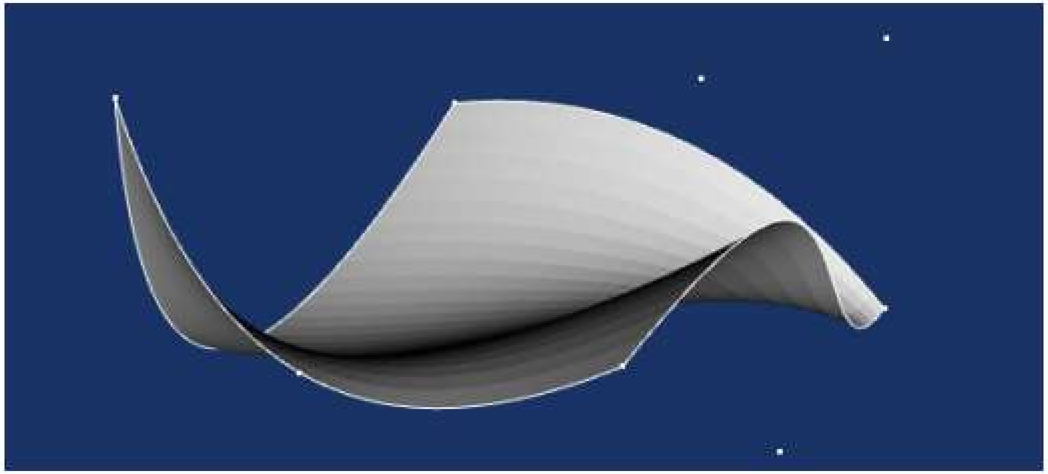
  - Pourquoi ?
    - S_1 interpole A,B,C,D
    - S_2 aussi
    - $S_1 + S_2$ ne peut donc interpoler A,B,C,D que si l'on y retire un terme dépendant uniquement de A,B,C,D et linéaire sur chaque bord.



$S(u,v)$

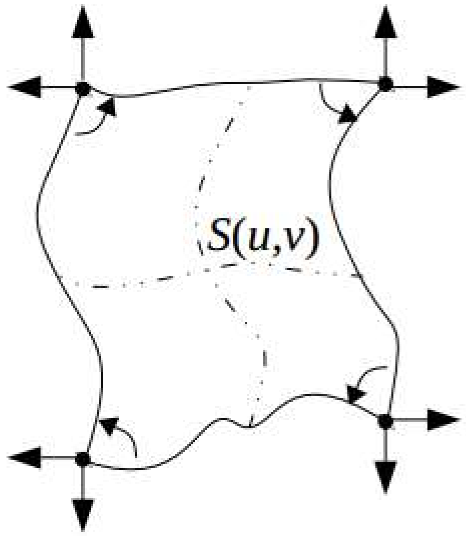
Patches de coons bilinéaires

- Caractéristiques du patch de Coons bilinéaire
  - Facile à construire
  - Basé sur des courbes frontières quelconques
  - Pas de contrôle de la forme intérieure de la surface
    - Impossible d'imposer une continuité C^1 entre deux patches voisins sans contraintes sur les courbes frontières



Patches de coons bicubiques

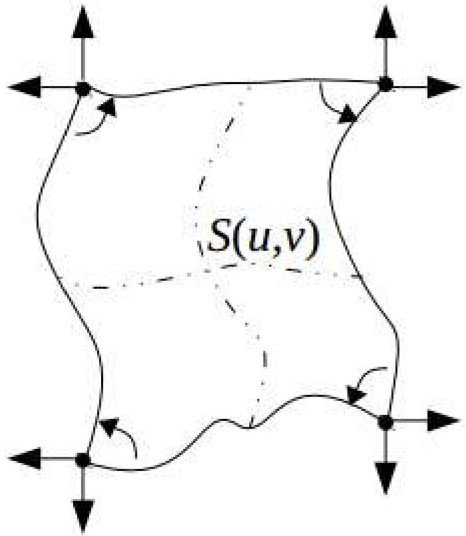
- Patch bicubique
  - Interpolation de Hermite
  - 4 positions aux coins
  - 8 dérivées normales
  - 4 vecteurs torsion aux coins



$$S_3(u,v)=\left(u^3,u^2,u,1\right)\mathbf{H}^T\begin{pmatrix} A_{00} & A_{01} & A_{00}^v & A_{01}^v \\ A_{10} & A_{11} & A_{10}^v & A_{11}^v \\ A_{00}^u & A_{01}^u & A_{00}^{uv} & A_{01}^{uv} \\ A_{10}^u & A_{11}^u & A_{10}^{uv} & A_{11}^{uv} \end{pmatrix}\mathbf{H}\begin{pmatrix} v^3 \\ v^2 \\ v \\ 1 \end{pmatrix}$$

Patches de coons bicubiques

- Patch bicubique
  - Interpolation de Hermite
  - 4 positions aux coins
  - 8 dérivées normales
  - 4 vecteurs torsion aux coins

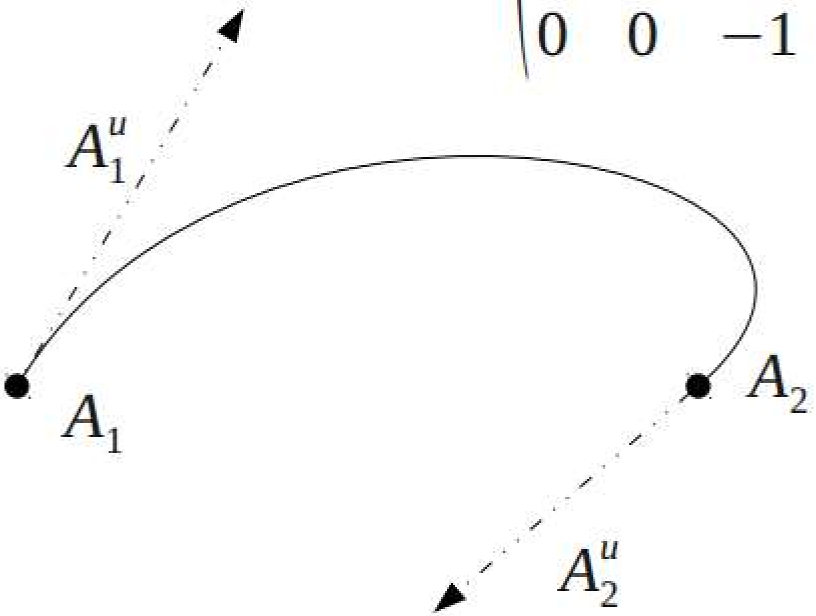


$$S_3(u,v)=\left(u^3,u^2,u,1\right)\mathbf{H}^T\begin{pmatrix} A_{00} & A_{01} & A_{00}^{v} & A_{01}^{v} \\ A_{10} & A_{11} & A_{10}^{v} & A_{11}^{v} \\ A_{00}^{u} & A_{01}^{u} & A_{00}^{uv} & A_{01}^{uv} \\ A_{10}^{u} & A_{11}^{u} & A_{10}^{uv} & A_{11}^{uv} \end{pmatrix}\mathbf{H}\begin{pmatrix} v^3 \\ v^2 \\ v \\ 1 \end{pmatrix}$$

Patches de coons bicubiques

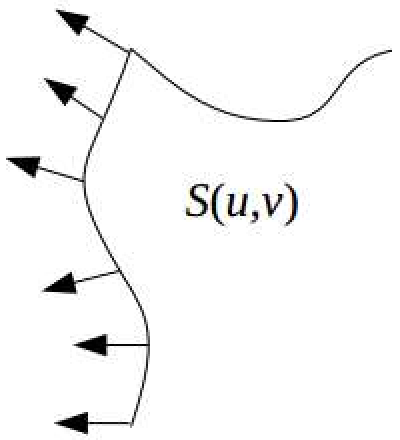
- **H** est la matrice de Hermite

$$C(u)=\left(A_1, A_2, A_1^u, A_2^u\right)\begin{pmatrix}1 & 0 & -3 & 2\\ 0 & 0 & 3 & -2\\ 0 & 1 & -2 & 1\\ 0 & 0 & -1 & 1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}u^3\\ u^2\\ u\\ 1\end{pmatrix}$$



Patches de coons bicubiques

- Patch de Coons bicubique
  - On peut construire une surface basée sur n'importe quelle courbes frontières comme pour le patch bilinéaire
  - 8 courbes sont nécessaire 4 courbes position + 4 dérivées normales correspondantes
  - Il y a des contraintes entre la dérivée sur le bord et la courbe position sur un bord coïncident

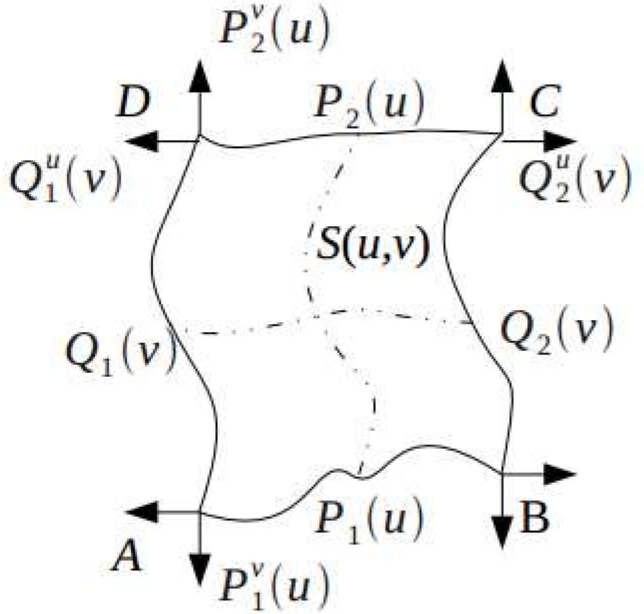


Patches de coons bicubiques

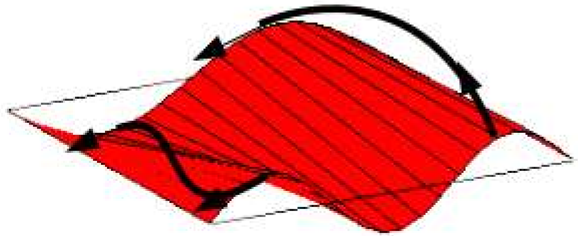
- On définit comme pour le cas bilinéaire deux surfaces partielles

$$S_1(u,v)=\left(P_1(u), P_2(u), P_1^v(u), P_2^v(u)\right)\mathbf{H}\begin{pmatrix} v^3 \\ v^2 \\ v \\ 1 \end{pmatrix}$$

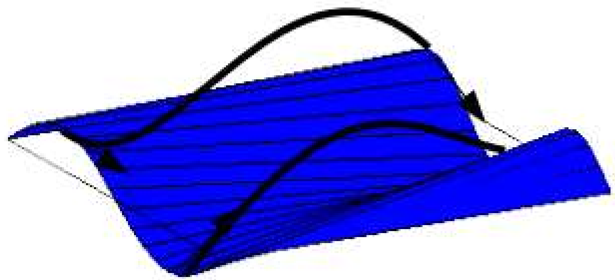
$$S_2(u,v)=\left(Q_1(v), Q_2(v), Q_1^u(v), Q_2^u(v)\right)\mathbf{H}\begin{pmatrix} u^3 \\ u^2 \\ u \\ 1 \end{pmatrix}$$



Patches de coons bicubiques



$S_1(u,v)$



$S_2(u,v)$

Patches de coons bicubiques

- Patch de Coons bicubique

$$S(u,v)=S_1(u,v)+S_2(u,v)-S_3(u,v)$$

$$S_3(u,v)=(u^3,u^2,u,1)\mathbf{H}^T\begin{pmatrix} A_{00} & A_{01} & A_{00}^v & A_{01}^v \\ A_{10} & A_{11} & A_{10}^v & A_{11}^v \\ A_{00}^u & A_{01}^u & A_{00}^{uv} & A_{01}^{uv} \\ A_{10}^u & A_{11}^u & A_{10}^{uv} & A_{11}^{uv} \end{pmatrix}\mathbf{H}\begin{pmatrix} v^3 \\ v^2 \\ v \\ 1 \end{pmatrix}$$

Les termes de la matrice sont déterminés à l'aide des courbes P et Q . et vérifient les conditions suivante :

$$A_{00}=P_1(0)=Q_1(0) \qquad A_{01}=P_2(0)=Q_1(1) \qquad A_{00}^v=P_1^v(0)=\frac{\partial Q_1}{\partial v}(0) \qquad A_{01}^v=P_2^v(0)=\frac{\partial Q_1}{\partial v}(1)$$

$$A_{10}=P_1(1)=Q_2(0) \qquad A_{11}=P_2(1)=Q_2(1) \qquad A_{10}^v=P_1^v(1)=\frac{\partial Q_2}{\partial v}(0) \qquad A_{11}^v=P_2^v(1)=\frac{\partial Q_2}{\partial v}(1)$$

$$A_{00}^u=Q_1^u(0)=\frac{\partial P_1}{\partial u}(0) \qquad A_{01}^u=Q_1^u(1)=\frac{\partial P_2}{\partial u}(0) \qquad \boxed{A_{00}^{uv}=\frac{\partial Q_1^u(v)}{\partial v}(0)=\frac{\partial P_1^v(u)}{\partial u}(0) \qquad A_{01}^{uv}=\frac{\partial Q_1^u(v)}{\partial v}(1)=\frac{\partial P_2^v(u)}{\partial u}(0)}$$

$$A_{10}^u=Q_2^u(0)=\frac{\partial P_1}{\partial u}(1) \qquad A_{11}^u=Q_2^u(1)=\frac{\partial P_2}{\partial u}(1) \qquad \boxed{A_{10}^{uv}=\frac{\partial P_1^u(v)}{\partial v}(1)=\frac{\partial Q_2^v(u)}{\partial u}(0) \qquad A_{11}^{uv}=\frac{\partial Q_2^u(v)}{\partial v}(1)=\frac{\partial P_2^v(u)}{\partial u}(1)}$$

Patches de coons bicubiques

- Patch de Coons bicubique

$$S(u,v)=S_1(u,v)+S_2(u,v)-S_3(u,v)$$

$$S_3(u,v)=(u^3,u^2,u,1)\mathbf{H}^T\begin{pmatrix} A_{00} & A_{01} & A_{00}^v & A_{01}^v \\ A_{10} & A_{11} & A_{10}^v & A_{11}^v \\ A_{00}^u & A_{01}^u & A_{00}^{uv} & A_{01}^{uv} \\ A_{10}^u & A_{11}^u & A_{10}^{uv} & A_{11}^{uv} \end{pmatrix}\mathbf{H}\begin{pmatrix} v^3 \\ v^2 \\ v \\ 1 \end{pmatrix}$$

Les termes de la matrice sont déterminés à l'aide des courbes P et Q . et vérifient les conditions suivante :

$$A_{00}=P_1(0)=Q_1(0) \quad A_{01}=P_2(0)=Q_1(1) \quad A_{00}^v=P_1^v(0)=\frac{\partial Q_1}{\partial v}(0) \quad A_{01}^v=P_2^v(0)=\frac{\partial Q_1}{\partial v}(1)$$

$$A_{10}=P_1(1)=Q_2(0) \quad A_{11}=P_2(1)=Q_2(1) \quad A_{10}^v=P_1^v(1)=\frac{\partial Q_2}{\partial v}(0) \quad A_{11}^v=P_2^v(1)=\frac{\partial Q_2}{\partial v}(1)$$

$$A_{00}^u=Q_1^u(0)=\frac{\partial P_1}{\partial u}(0) \quad A_{01}^u=Q_1^u(1)=\frac{\partial P_2}{\partial u}(0) \quad A_{00}^{uv}\ \text{tq}\ \frac{\partial^2 S}{\partial u\partial v}(0{,}0)=0 \quad A_{01}^{uv}\ \text{tq}\ \frac{\partial^2 S}{\partial u\partial v}(0{,}1)=0$$

$$A_{10}^u=Q_2^u(0)=\frac{\partial P_1}{\partial u}(1) \quad A_{11}^u=Q_2^u(1)=\frac{\partial P_2}{\partial u}(1) \quad A_{10}^{uv}\ \text{tq}\ \frac{\partial^2 S}{\partial u\partial v}(1{,}0)=0 \quad A_{11}^{uv}\ \text{tq}\ \frac{\partial^2 S}{\partial u\partial v}(1{,}1)=0$$

Patches de coons bicubiques

- On peut imposer la position et la tangente normale le long des 4 bords
- Reste le problème de la continuité aux coins
  - On impose habituellement que les dérivées croisées soient nulles.
  - Il existe d'autres techniques dans la littérature...