

# Dessin des masques

technologies  
règles de dessin

Université Pierre et Marie Curie  
Master ACSI  
Outils pour la Conception VLSI

# Que est le problème?

---

- Un circuit numérique est constitué principalement de transistors reliés par des fils conducteurs gravés sur un substrat.
- Tous les éléments doivent respecter des règles de positionnement (taille, distance, recouvrement, densité...)
- Chaque technologie (process) impose ses propres règles.
- Un nouveau processus est créé tous les 18 mois.
- Le dessin est une activité très délicate et chacun essaie de pérenniser le résultat pour ne pas avoir à tout refaire à chaque fois.

# Plan

---

- Principes du procédé de fabrication CMOS
- Dessin réel
- Dessins sur grille lambda
- Dessins symboliques sur grille lambda
- Les règles symboliques Alliance
- Problèmes à venir

# Procédé defabricationCMOS

---

## Plan

- Matièrepremière
- Structureencouches
- Principedelagravure
- Notiondemasques
- Typesderègles

# Procédé defabricationCMOS

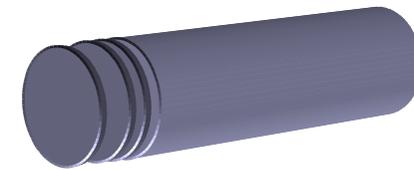
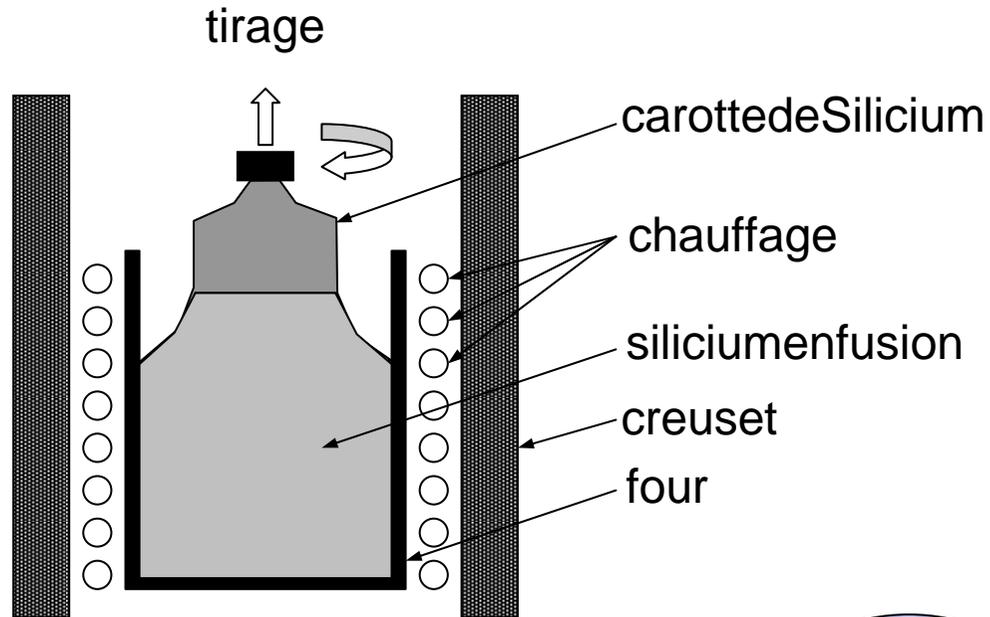
---

## Structureencouches

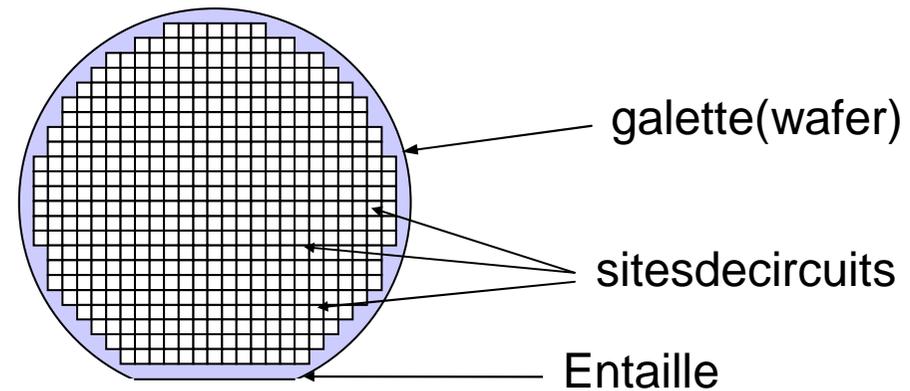
- Uncircuitintégré estcomposé d'unassemblagede couches, qui peuvent être:
  - semi-conductrices :pourformerlestransistors ;
  - métalliques :pourrelierlestransistorsentreeux ;
  - isolantespourséparerlescouchessemi-conductric esoules couchesmétalliquesentres-elles.
- Lescouchessontdéposéesuivantunordreprécis grâceà unprocédé photolithographique.
- Lesubstratpeut-êtrsemi-conducteurouisolant.

# Procédé defabricationCMOS

Unecarottepureà 99.999999 %

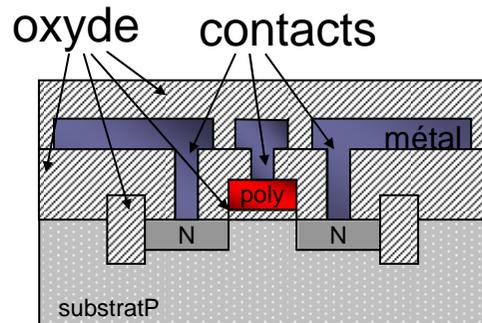


découpage des gallettes



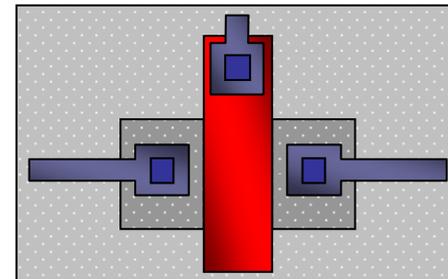
# Procédé defabricationCMOS

## Uneconstructionen3D



**vueencouped'untransistorN**

Onremarqueleszonesd'oxyde quiisolelestransistorsentreeux, quiisolelagrilledusubstrat, qui isolelemétaldusilicium, l'oxyde estpercé pourréaliserles contacts.

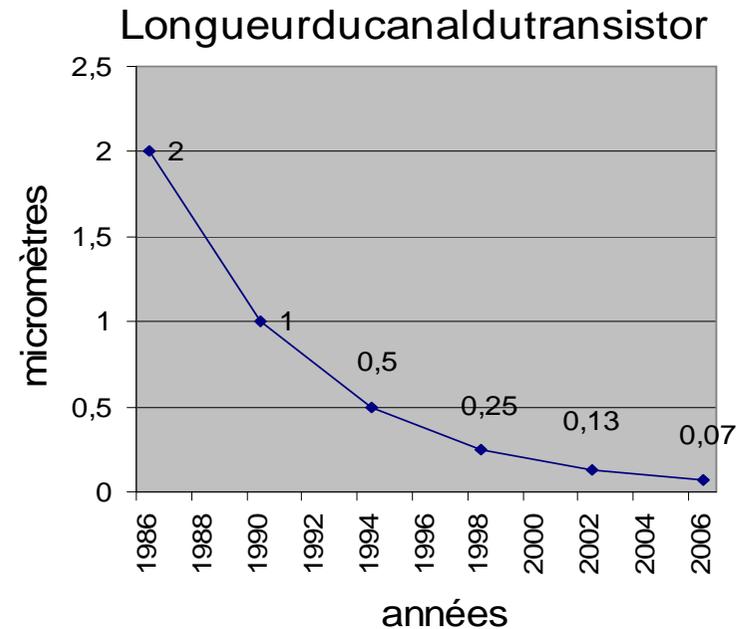
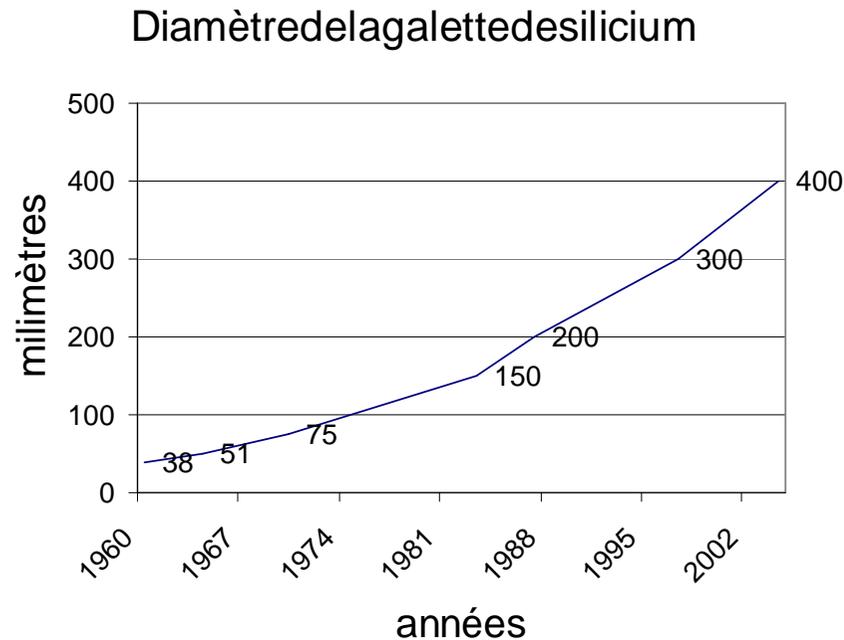


**lemêmetransistorvudedessus**

C'estainsiqueledessinele concepteursuperposantdes rectanglesdecouleurs, chaque couleurreprésentantunecouche différente.

# Procédé defabricationCMOS

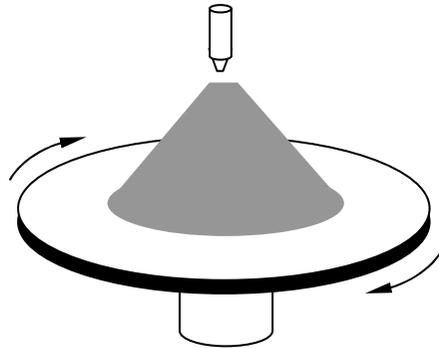
## Évolutiondelatechnologie



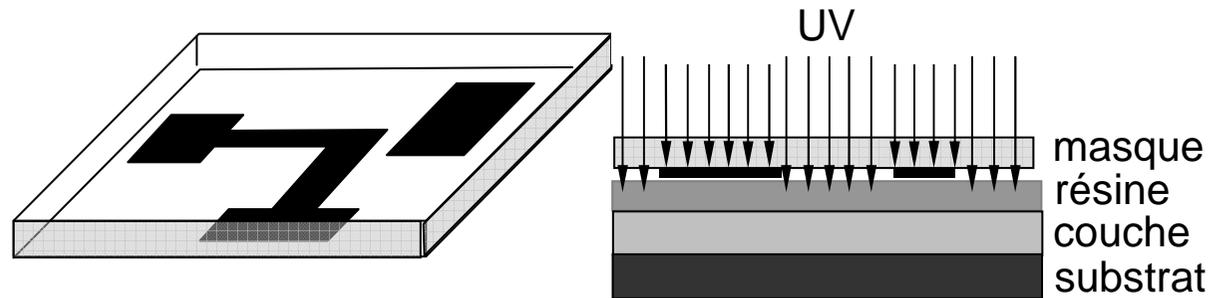
EnCMOS,oncaractériseunetechnologieparlalongueur  
ducanaldutransistorlepluspetitdessinable.

# Procédé defabricationCMOS

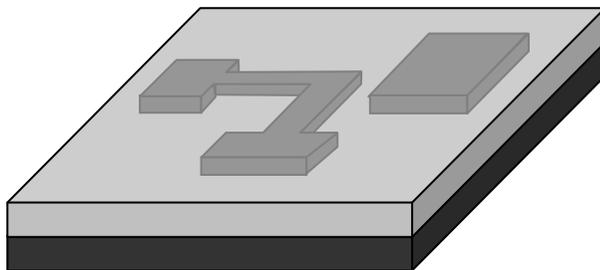
## Séquencephotolithographiqueà résinepositive



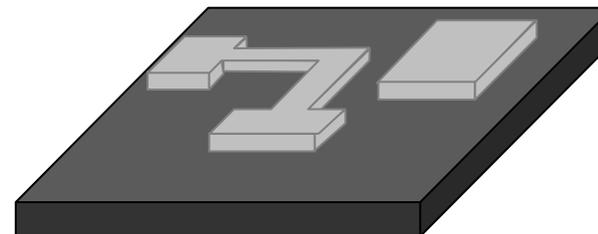
1) diffusion de la résine sur toute la galette.



2) sensibilisation par UV à travers le masque.  
Le masque est posé sur la résine et insolé



3) élimination de la résine non durcie.  
La résine ayant subi le rayonnement UV est fragilisée afin d'être éliminée.



4) gravure et nettoyage de la résine.  
La couche non protégée par la résine est gravée, reproduisant le masque, puis la résine est éliminée

# Procédé defabricationCMOS

## RéalisationducaissonNsursubstratP



(1)partantdusubstrat(2)déposé d'unecouche

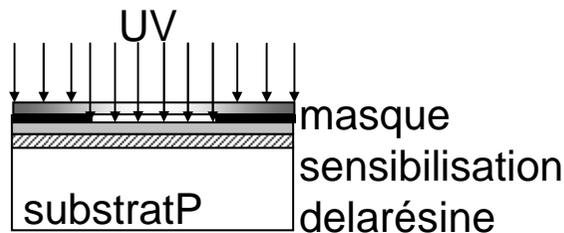


oxydefin



résine  
oxydefin

d'oxyde(3)déposé d'unecouche de résine

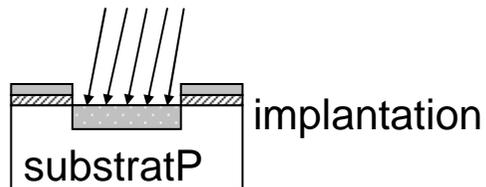


(4)insolationdeszonesà doper(



5)retraitdel'oxydesouslarésineinsolée

bombardement d'atomes d'arsenic



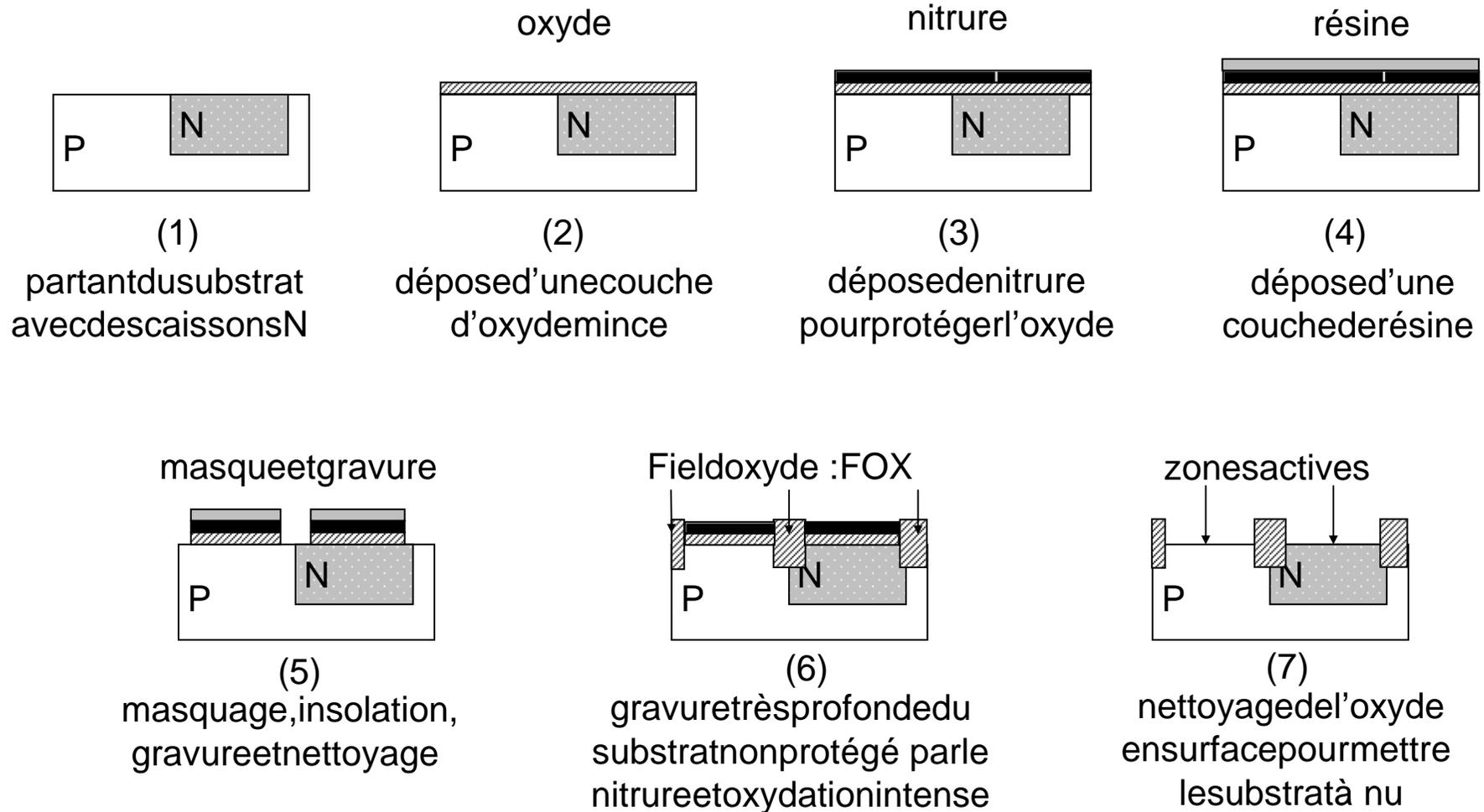
(6)dopageNprofond



(7)nettoyage.

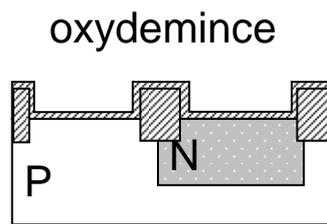
# Procédé defabricationCMOS

## Créationdeszonesactives



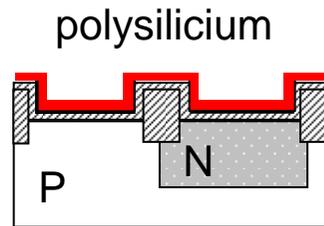
# Procédé defabricationCMOS

## Créationdupolysilicium



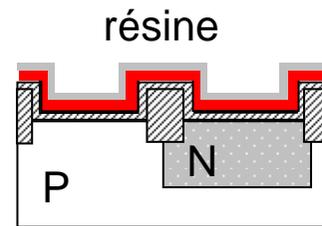
(1)

déposé d'une  
couche oxyde  
mince



(2)

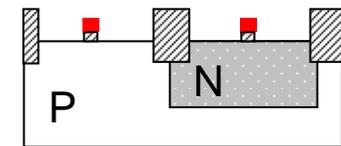
déposé du  
polysilicium



(3)

déposé d'une  
couche de résine

masque et gravure



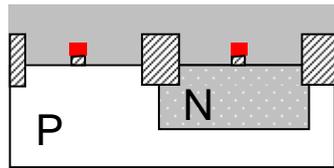
masquage, insolation,  
gravure et nettoyage  
pour laisser que le  
polysilicium nécessaire

La création des grilles avant celles des drains et  
l'auto-alignement du transistor!

ources permet

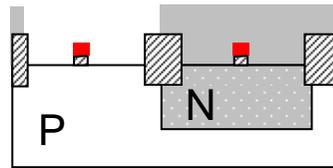
# Procédé defabricationCMOS

## InplantationdesactivesNetP



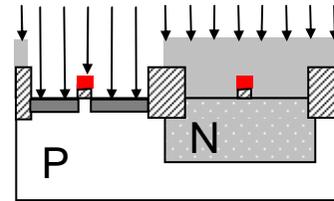
(1)

déposé d'une  
couche de résine



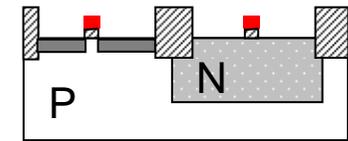
(2)

masquage, insolation,  
gravure et nettoyage  
afin de réduire le  
dopage aux seules  
zones non protégées



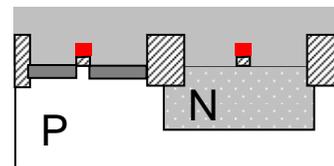
(3)

dopage N



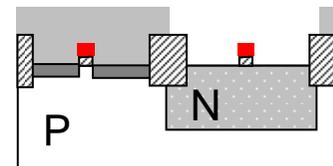
(4)

nettoyage



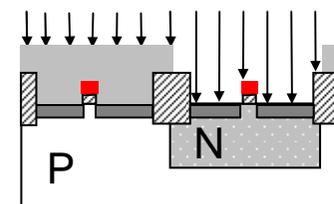
(5)

résine



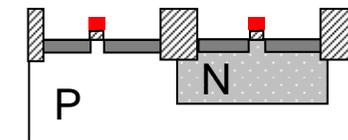
(6)

masque et gravure



(7)

dopage P



(8)

nettoyage

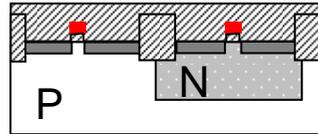
(5), (6), (7) et (8) sont similaires, mais pour les

opages de transistors P.

# Procédé defabricationCMOS

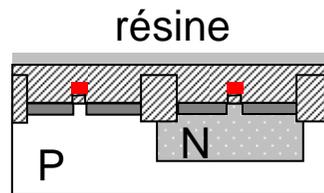
## Déposedel'isolantetpercementdestrous

### Déposedel'oxydeépais

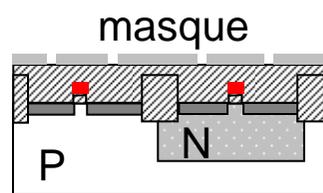


Cetteétaped'oxydationépaissepermetd'isolerles transistorsdes couchesdemétalservantauxinterconnexions.L'oxy deestpolide manièreà obtenirunesurfaceplane.

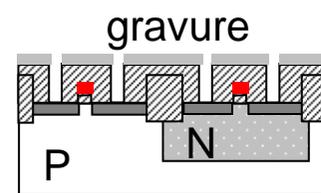
### Percementdescuts(trous)



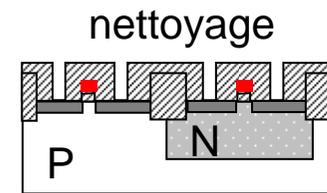
(1)  
déposed'une  
couchederésine



(2)  
masquageet  
insolationdela  
résine,



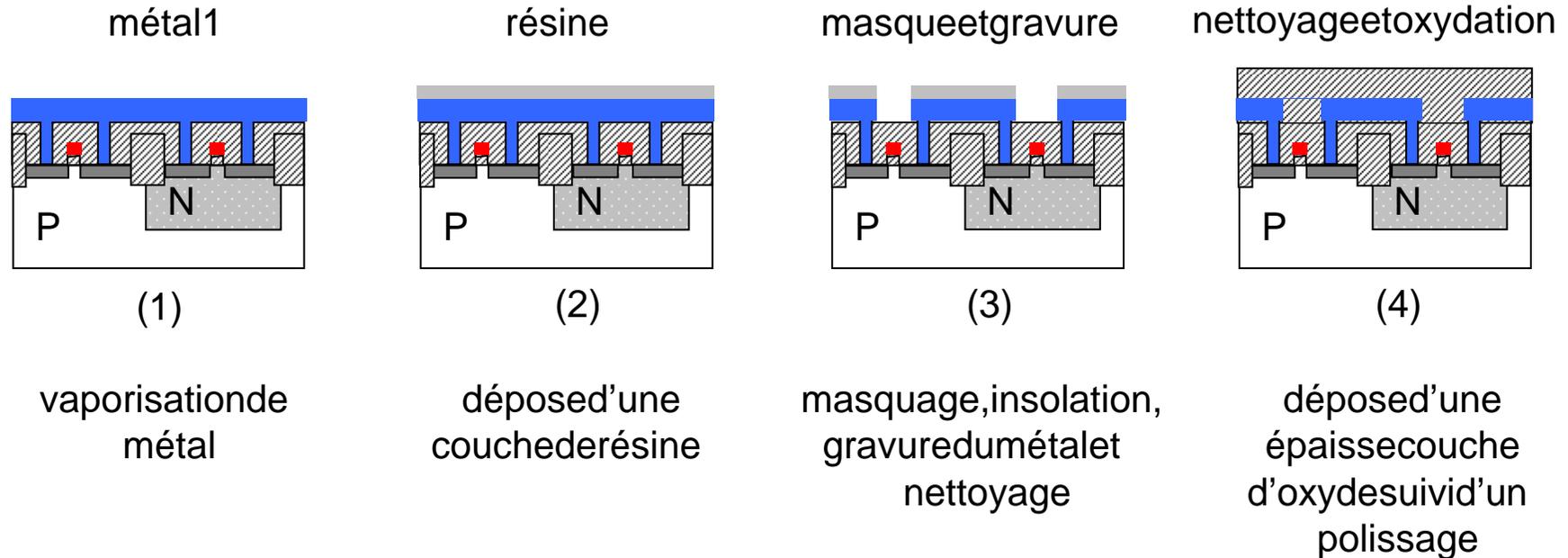
(3)  
gravuredel'oxyde



(4)  
nettoyage

# Procédé defabricationCMOS

## Déposedumétal(aluminium)



vaporisationde  
métal

déposed'une  
couchederésine

masquage,insolation,  
gravuredumétalet  
nettoyage

déposed'une  
épaissecouche  
d'oxydesuivid'un  
polissage

Pourlesautrescouchesdemétal.

Onprocèdedelamêmemanière :Cuts,métaletoxyde

Ontermineparunecouchedepassivation

épais.

# Procédé defabricationCMOS

---

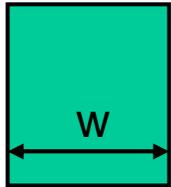
## Listedesniveaux

- Lefondeurattendunesériedemasquespermettant la créationdechaquecouche:
    - caissonN(éventuellementcaissonP)
    - zoneactive
    - polysilicium
    - implantationN
    - implantationP
    - cutsmetal1(trousmetal1verscaissons,polysiliciumouimplantations)
    - metal1
    - cutsmetal2
    - metal2
    - passivation
- } idemmetal3,4,5,6....

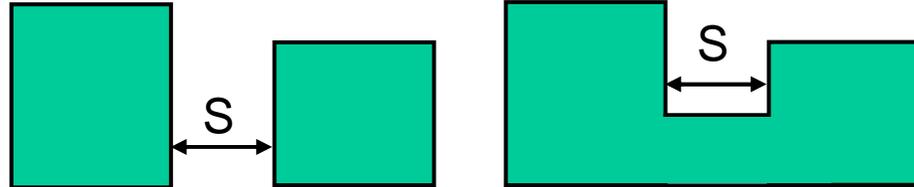
➔ Entoutunevingtainedecouches.

# Procédé defabricationCMOS

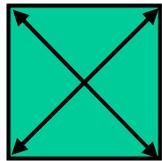
## Typederègles



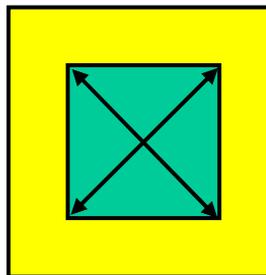
largeur(width)  
min/max



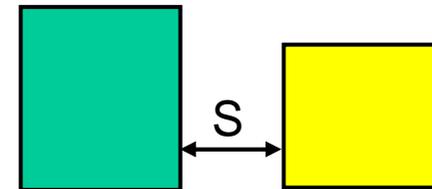
distance(space)mêmeniveau  
min/max



surface  
min/max



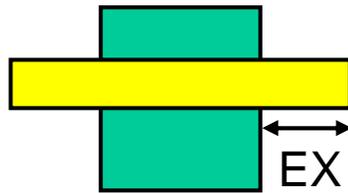
surface(area)  
incluse  
min/max



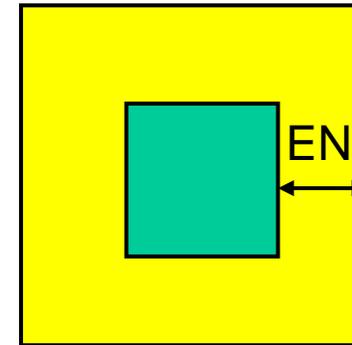
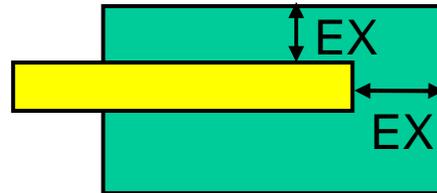
distanceniveauxdifférents  
min/max

# Procédé defabricationCMOS

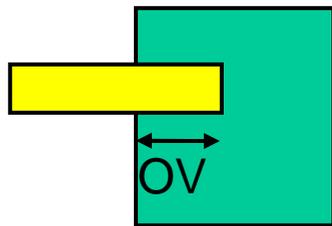
## Typederègles



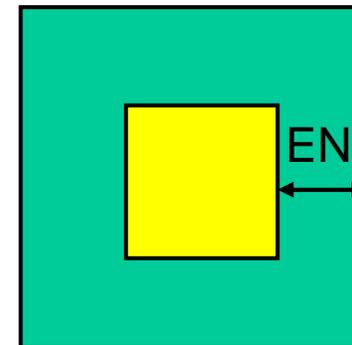
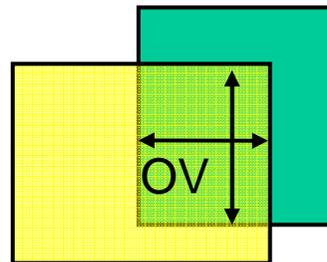
extension  
min/max



inclusion(enclosure)  
min/max



recouvrement(overlap)  
min/max



inclusion(enclosure)  
min/max

# Le dessin aux règles fondeur

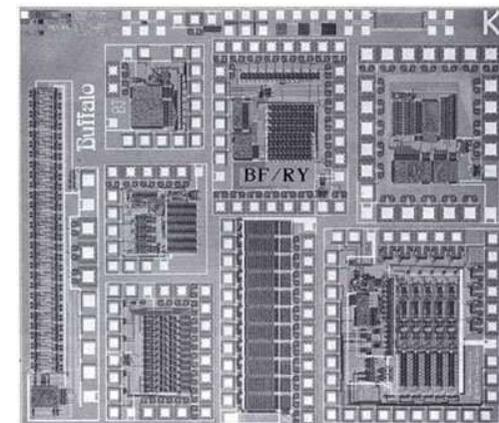
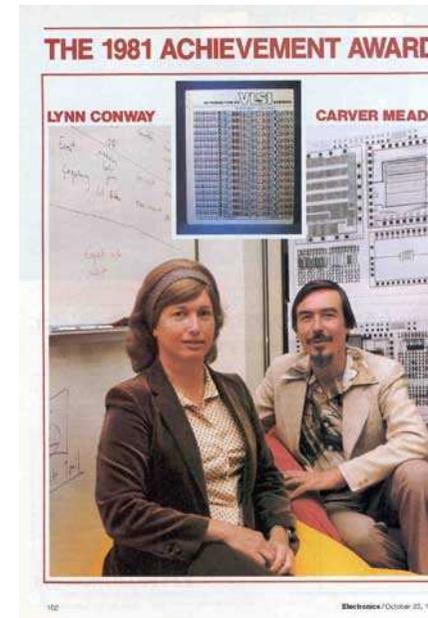
---

- Chaque technologie a ses propres règles
  - TechnoES21 $\mu$ m  $\approx$  90 règles
  - TechnoST90nm  $\approx$  400 règles
- Tous les masques sont sur une grille minimale ( $\approx$  1/10 la longueur minimale d'un transistor).
- Si on dessine en suivant les règles du fondeur, on dessine tout:
  - il faut apprendre les règles!
  - De fait réservé aux fondeurs ou aux circuits analogiques.
- Pour pérenniser son travail, chaque fondeur essaie d'avoir des règles homothétiques entre ses technologies pour limiter le re-dessin.

# Les dessins sur grille lambda

## Origine

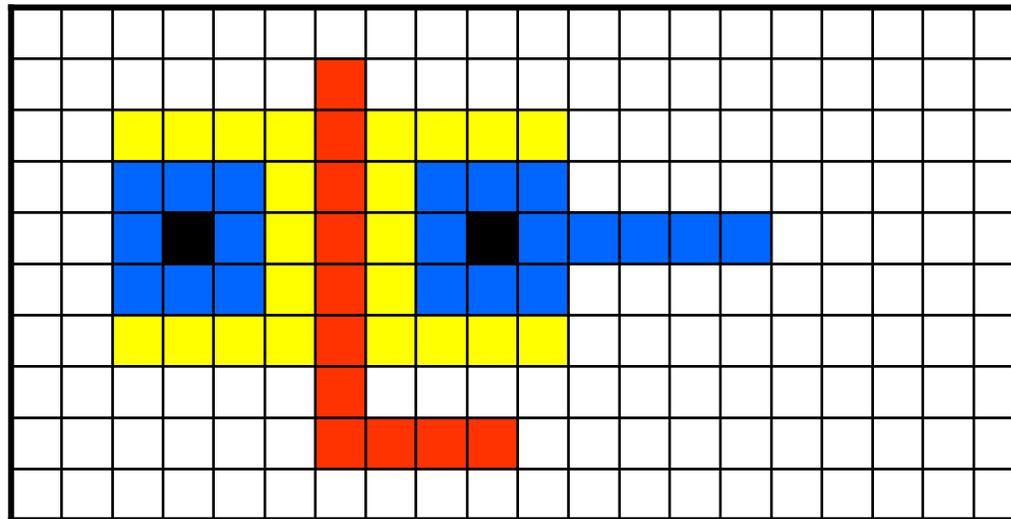
- Révolution méthodologique:  
Mead & Conway 1980
  - créateurs d'une méthodologie de conception de VLSI par des non-spécialistes (à partir de 1978)
  - à l'origine du MOSIS (1981), un organisme américain donnant l'accès aux fondeurs grâce à des runs multi-chips. L'équivalent français, le CMP, est aussi né en 1981.
  - Mead & Conway ont proposé, entre autres, une méthode de dessin permettant d'être indépendant du fondeur cible.



# Ledessin sur grille lambda

## Principes

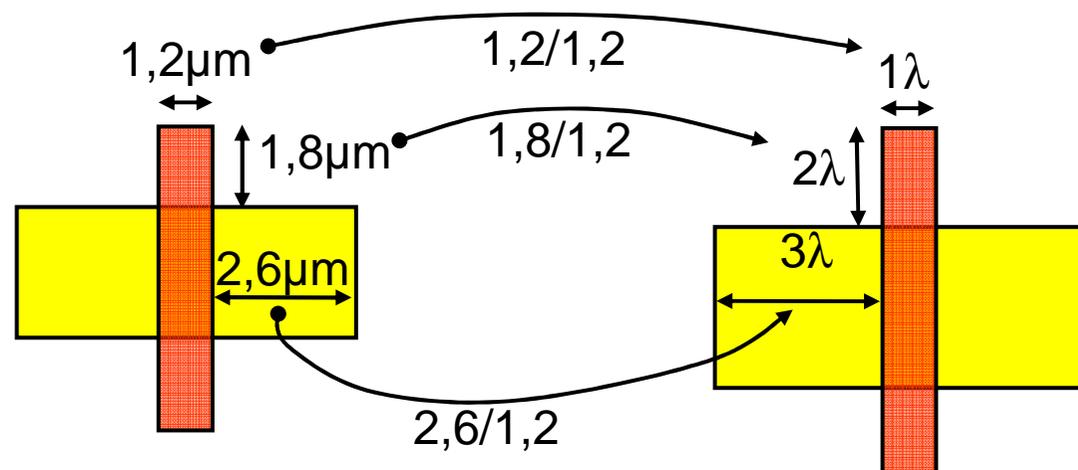
- Ledessin se fait sur une grille régulière avec un pas de  $1 \lambda$ .
- La valeur du  $\lambda$  est de l'ordre de grandeur de la longueur minimale de la grille d'un transistor (5 à 10 fois la largeur de la grille du fondeur).
- Ledessin se fait avec des rectangles de différents types.
- Les dimensions des rectangles sont des multiples de  $u \lambda$ .



# Lesdessinsurgrillelambda

## Principes

- Les règles  $\lambda$  sont obtenues à partir des règles réelles par un changement d'échelle et un arrondi aux valeurs entières supérieures.
- On peut définir un jeu de règles valable pour plusieurs technologies en prenant pour chaque règle la plus contraignante.
- Le passage d'un dessin aux règles  $\lambda$  à un dessin aux règles réelles est un simple homothétie.



# Ledessinsurgrillelambda

---

## Critiques

- Avantages
  - Unjeuderègle  $\lambda$  estunpetitensembledevaleursentièresdonc facileà connaître.
- Inconvénients
  - l'unicité duparamètrelambdaaboutià despertesde surface importanteslorsdupassageauréel.
- Onpeutaméliorerunpeuleschosesenpassantà un  $e$  grillede2  $\lambda$  pouraméliorerlaprécision.
- Toutefois,l'existenced'unjeuderègle,pastrop mauvais,pourunensembledetecnologiessefonde surl'hypothèsequelesdimensionsetlesdistances varientpeuventrelestecnologies...  
→ Or,c'estfauxdanslaréalité !

# Les autres dessins lambda

---

Il existe plusieurs versions améliorées du dessin lambda de Mead & Conway.

Toutes cherchent à conserver:

- la simplicité des règles et
- le choix tardif de la technologie cible,

Mais en réduisant au maximum:

- la perte en surface par rapport à un dessin réel.

Le dessin symbolique lambda d'Alliance est une des alternatives (la meilleure sans aucun doute 😊 !)

# Ledessinsymboliquelambda

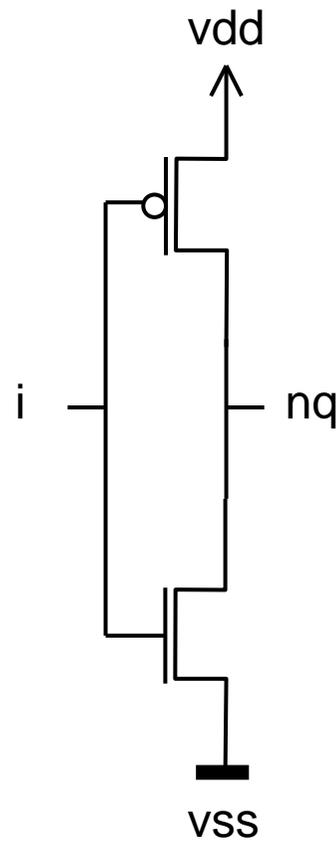
---

## Définition

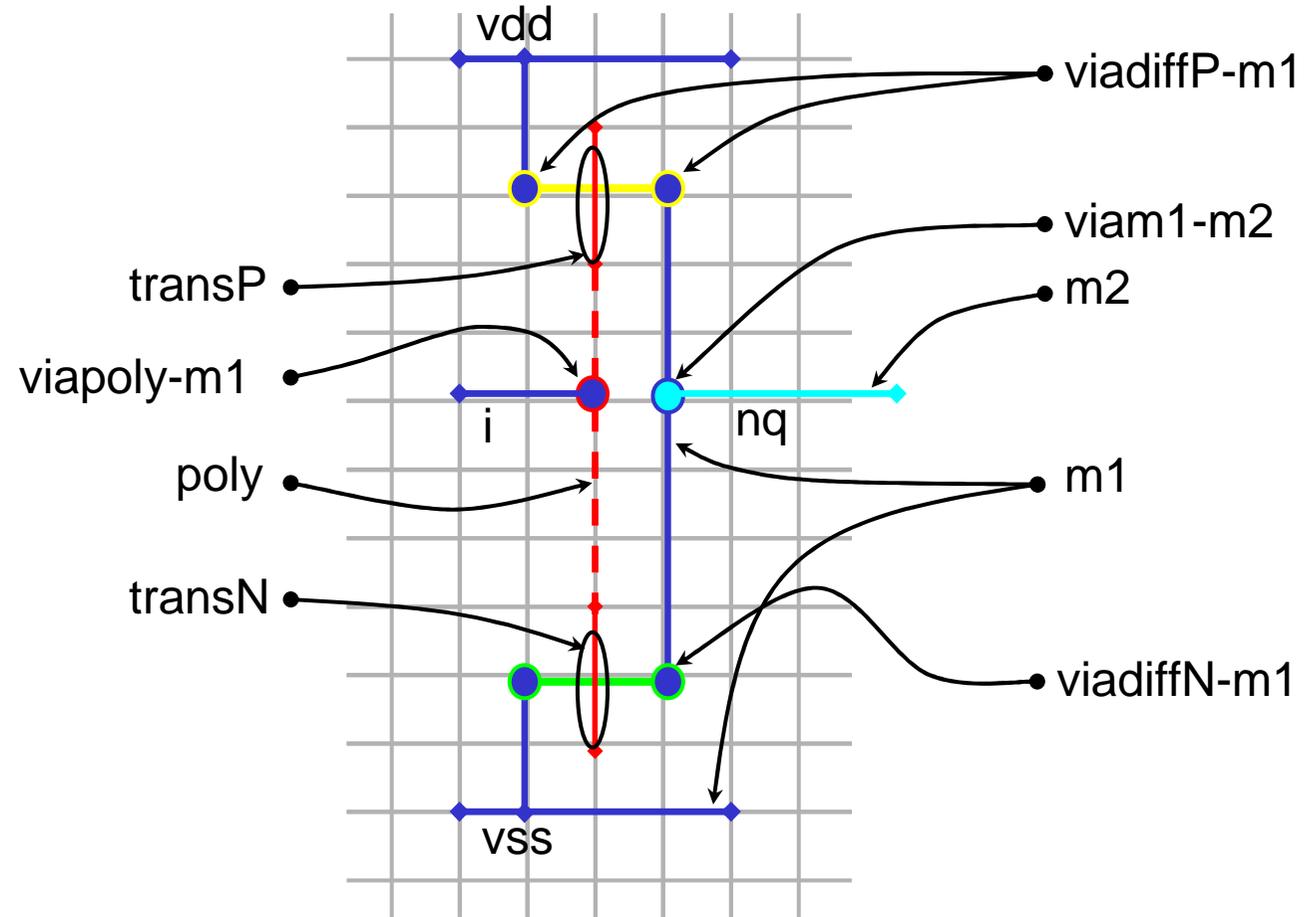
- Ledessinsymboliqueutiliseunereprésentationstick.
  - Seulslesaxesdesfilssontreprésentés.
  - Unfilreprésenteunsymbole:segment(2-points) ouvia(1-point)
  - Lenombreetletypedessymbolesestréduit:  
metalrun,metalcontact,polysilicium,contact,viaa12,via23,etc,  
diffusions (*intersectiond'unezoneactiveetd'uneimplantation*),  
transistors (*croisementd'unpolysiliciumetd'unediffusion*), ...
  - Lessymbolespeuventêtreannotésparunelargeur.
- Ledessinsymboliquelambdasefaitsurunegrille régulièreaupasde1lambda.
- *Ledessinsymboliquepeutêtreutilisé commebasepour desalgorithmesdecompaction(maisceux-cisont inefficacesdanslecasgénéral).*

# Lesdessinsymboliquelambda

## Définition



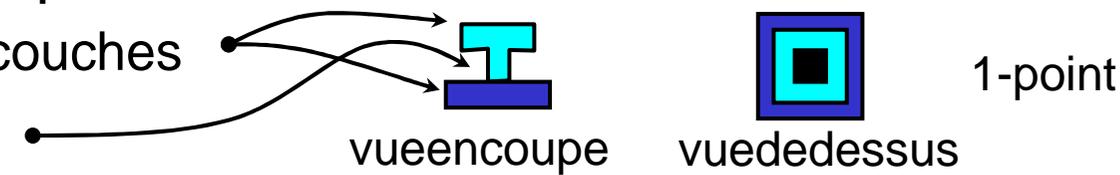
Schémad'uninverseur.

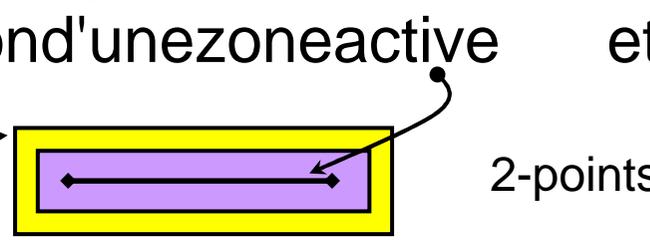


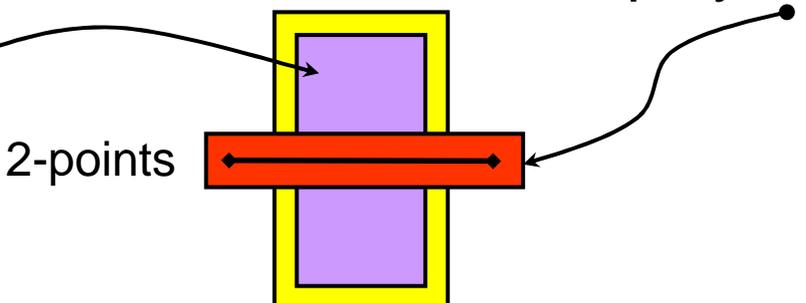
Lagrilleaunpasde1lambda.

# Les dessins symboliques lambda

## Macrogénération des motifs

- Les transistors, les diffusions et les vias sont des symboles. Ils représentent toutes les couches nécessaires à leur existence.
- Un via est un point de liaison entre deux couches
  - les deux couches
  - et le cut

The diagram shows a via symbol. On the left, a cross-section labeled 'vue en coupe' shows a blue rectangular cut through a purple layer. On the right, a top view labeled 'vue de dessus' shows a blue square with a black square in the center. Arrows point from the text 'les deux couches' and 'et le cut' to the corresponding parts of the cross-section. The label '1-point' is to the right of the top view.
- Une diffusion est l'intersection d'une zone active et d'une zone d'implantation

The diagram shows a diffusion symbol. It consists of a purple rectangular active zone inside a yellow rectangular implantation zone. A double-headed arrow is inside the purple zone. Arrows point from the text 'zone active' and 'zone d'implantation' to the respective parts. The label '2-points' is to the right.
- Un transistor est le croisement d'un polysilicium et d'une diffusion

The diagram shows a transistor symbol. It consists of a purple rectangular polysilicium region and a red rectangular diffusion region crossing each other. A double-headed arrow is inside the red region. Arrows point from the text 'polysilicium' and 'diffusion' to the respective parts. The label '2-points' is to the left.

# Les dessins symboliques lambda

---

## Fondement

Une étude statistique ( *Greiner90* ) sur une vingtaine de technologies de  $2\mu\text{m}$  à  $0.6\mu\text{m}$  a montré que les paramètres géométriques les plus homogènes sont les distances centre-à-centre des fils de largeur minimale.

En d'autres termes:

entre 2 technologies équivalentes ( même longueur de grille ),

- la largeur minimale des fils change,

- la distance minimale entre les fils change,

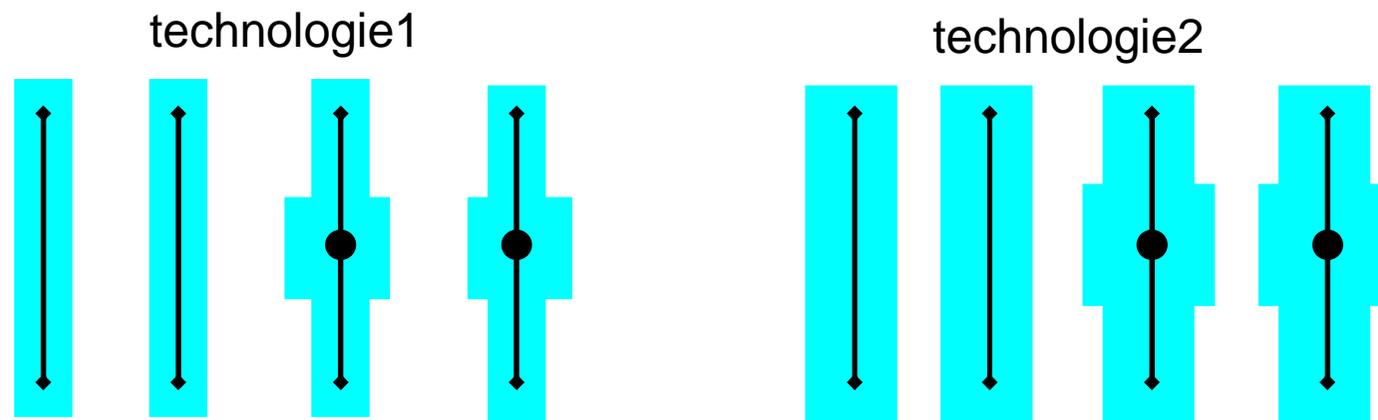
mais

- la distance centre-à-centre ne change pas ou peu.

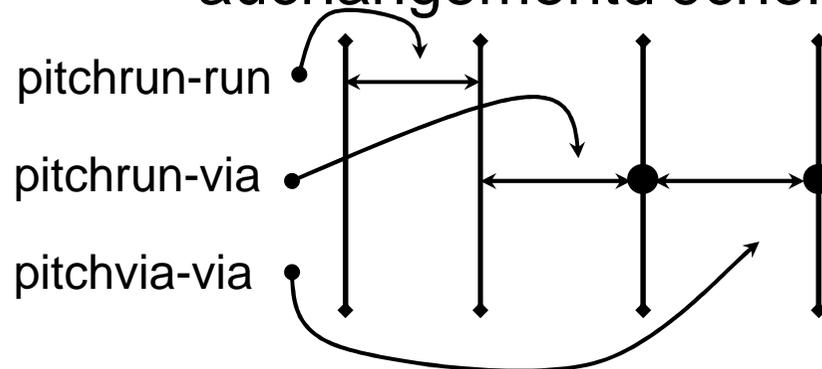
# Le dessin symbolique lambda

## Fondement (illustration)

Motifs définissant les règles de distance d'une couche



Les règles de largeur et de distance sont différentes, mais les règles entre les axes sont les mêmes au changement d'échelle près.



# Le dessin symbolique lambda

---

## Principe de génération des règles symboliques

Pour chaque motif, on procède comme pour le dessin lambda mais sur la représentation symbolique.

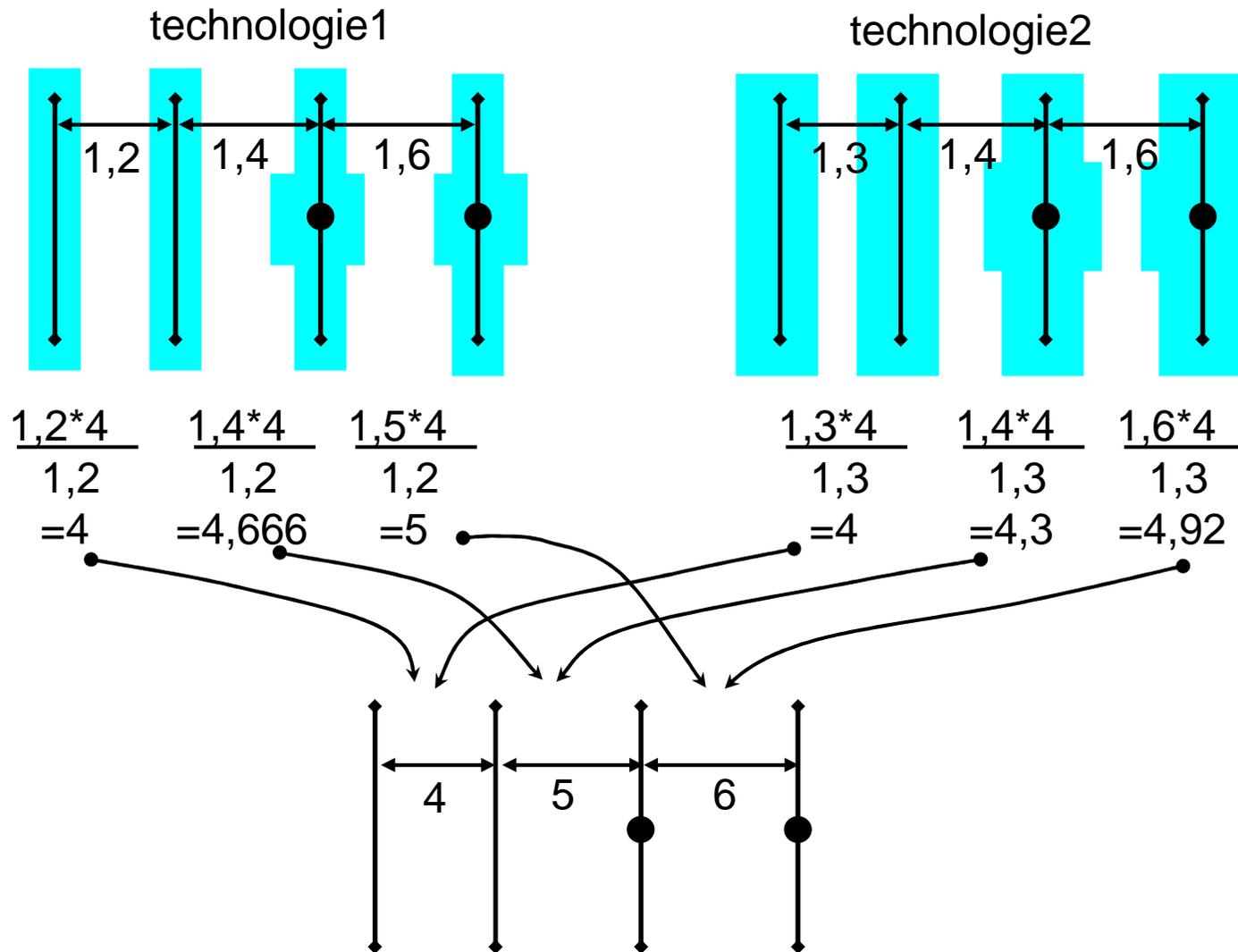
Pour définir la distance en lambda entre les axes

- 1) On fait un changement d'échelle.
- 2) On arrondit aux entiers supérieurs.

Ce travail est fait pour plusieurs technologies et on conserve les règles les plus contraignantes.

# Lesdessinsymboliquelambda

## Principedegénérationdesrèlessymboliques

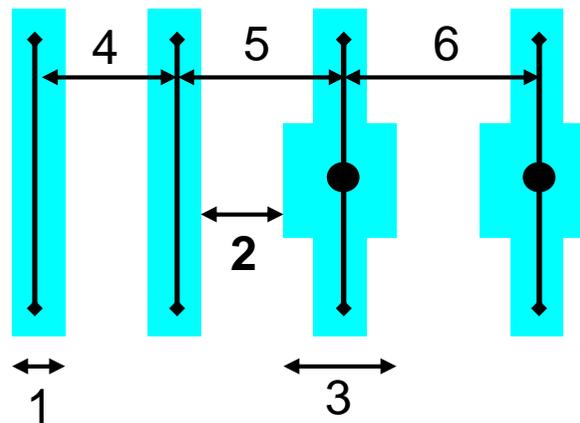


# Dessins symboliques $\lambda$

## Principe de génération des règles symboliques

On définit ensuite une largeur minimale symbolique  $\lambda$  par :

- 1) La largeur minimale symbolique est définie de telle sorte que la distance symbolique entre deux bords de fil symbolique soit la même quel que soit le motif.
- 2) La largeur symbolique est un nombre entier de  $\lambda$ .



Dans cet exemple, en prenant  $\lambda$  comme largeur minimale symbolique et  $3\lambda$  quand le fil est ou une via, on obtient  $2\lambda$  pour la distance minimale.

# Les dessins symboliques lambda

---

## Définition d'un jeu de règles

Un jeu de règles symboliques est défini pour chaque type de fil

- une largeur minimale,
- une distance minimale,

mais aussi

- une enveloppe minimale pour les vias,
- une extension minimale pour les transistors et les diffusions

# Le dessin symbolique $\lambda$

## Passage du symbolique au réel

- Un fil de largeur symbolique minimale sera traduit en un ou plusieurs rectangles réels de largeur minimale.

Pour un type de fil donné

les largeurs minimales réelle et symbolique sont telles que :

$$W_{\text{réel}}_{\text{min}} = W_{\text{symb}}_{\text{min}} * \lambda + \Delta W_{\text{réel}}$$

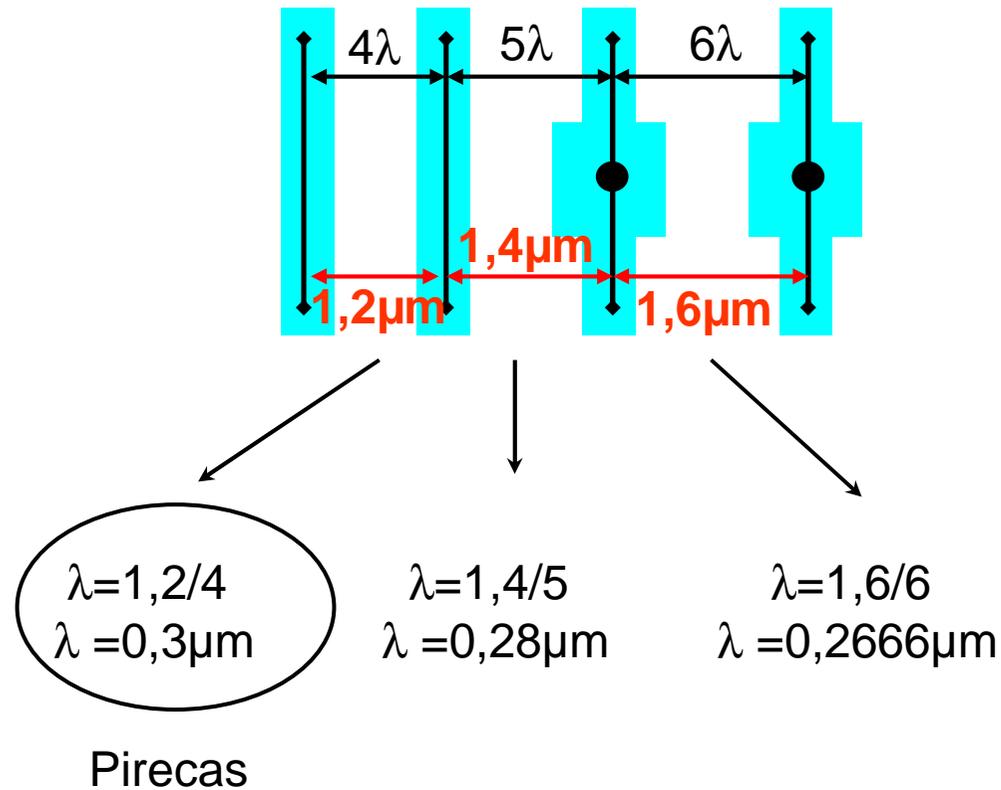
et ceci pour chaque rectangle constituant le fil.

- Pour un type de via donné  
Les dimensions de chaque rectangle réelle constituant sont imposées et fixes.
- Pour passer d'un dessin symbolique à un dessin réel, il faut connaître la valeur de  $\lambda$ , le  $\Delta W$  de chaque type de fil et la définition de chaque via.

# Le dessin symbolique lambda

## Calcul de la valeur du lambda

On prend toutes les règles symboliques, on les compare aux règles réelles correspondantes et on garde les meilleures.



# Les dessins symbolique lambda

---

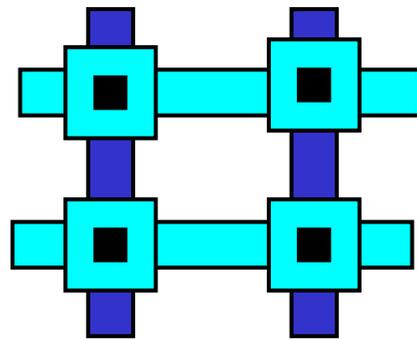
## Retour sur Mead & Conway

- Dans la méthode Mead & Conway d'origine, le passage du dessin symbolique à réel se réduit à un changement d'échelle en imposant une valeur pour le lambda.
- Dans la méthode dessin symbolique lambda, on passe du dessin symbolique à réel en commençant par un changement d'échelle puis on réduit et augmente la largeur des fils en fonction de leur type.
  - On passe ainsi de 1 à N paramètres
- Ceci est l'une des raisons pour laquelle le dessin symbolique lambda donne de meilleurs résultats. Une autre raison est la prise en compte des caractéristiques des circuits VLSI numériques.

# Le dessin symbolique lambda

## Amélioration du jeu de règles

- Dans la majorité des circuits VLSI, la densité des fils de routage (métal) est beaucoup plus importante que la densité des fils utilisés pour faire les transistors. En fait la densité des niveaux métalliques est proche du maximum.
- En d'autres termes, ce ne sont pas les règles de dessin des couches composant les transistors qui imposent la dimension d'un circuit, ce sont les règles de couches permettant le routage c'est-à-dire les règles définissant le pitch de routage.



motif dessiné aux règles minimales

# Les dessins symboliques lambda

---

## Amélioration du jeu de règles

- La nécessité d'un jeu de règles symboliques unique pour l'ensemble des technologies ne peut pas faire sa part de surface.
- Mais, il est préférable que la perte soit due aux motifs les plus denses et non pas aux motifs les plus rares.
- Lorsque les règles symboliques ont été définies, les règles portant sur les couches définissant le strans sont relâchées.
- Ainsi lorsque l'on calcule la valeur du lambda pour une technologie donnée, les règles les plus contraignantes sont toujours les règles métal.

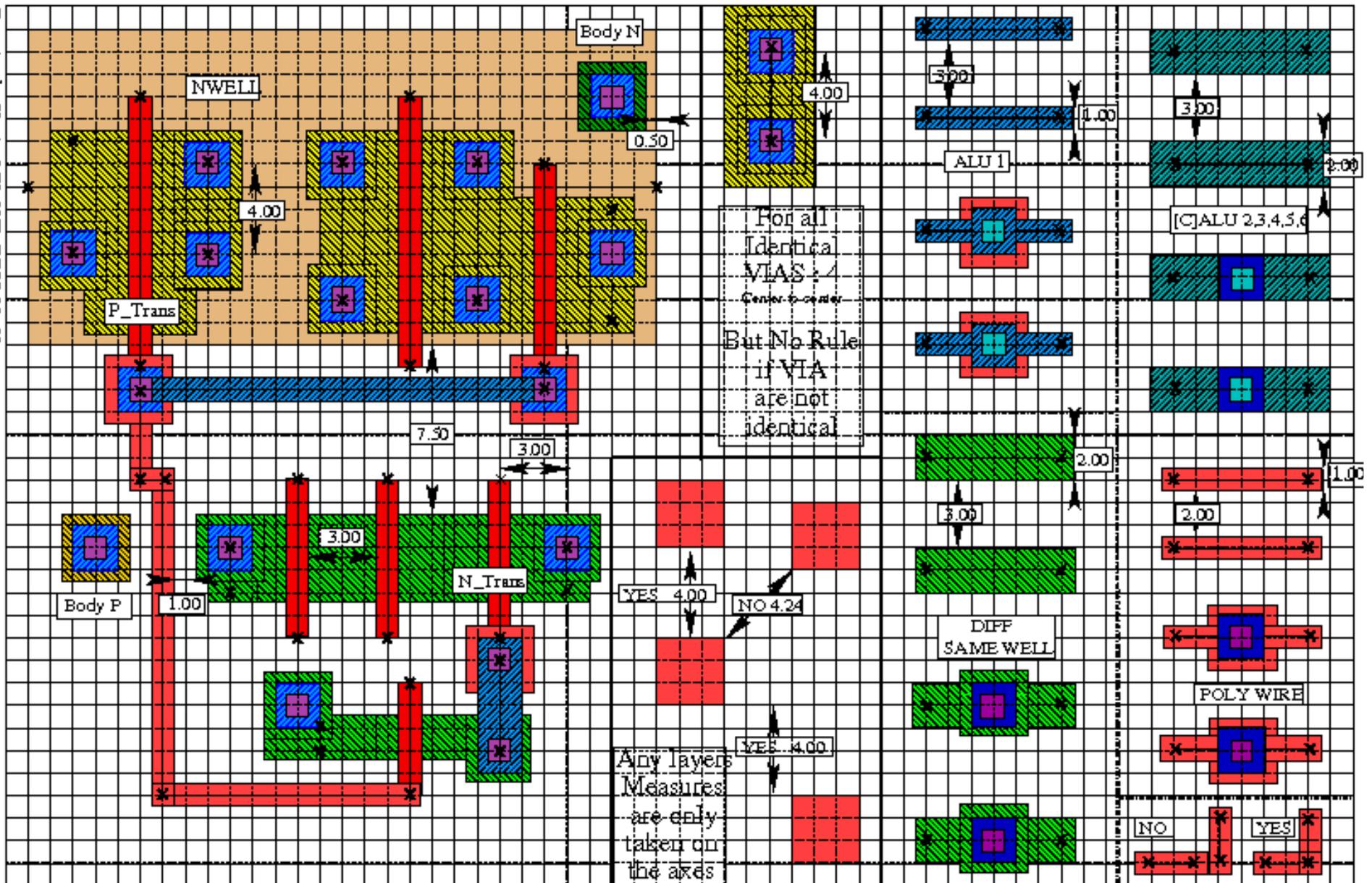
# Les règles de dessin Alliance

---

- Le dessin est fait sur une grille au pas de  $1\lambda$
- Le dessin utilise des objets mono-point ou bi-points
  - mono-point: via(type), référence(nom), ...
  - bi-points: segment(type, largeur) horizontal ou vertical  
big-via(type, largeur) surface définie par un diamètre  
boite d'aboutement. idem
- Les segments ont une largeur minimale qui s'étend de part et d'autre du centre et une extension aux extrémités.
  - On peut augmenter la largeur par pas de  $1\lambda$ ,
  - l'extension est fixe.
- Les objets sont constitués de plusieurs couches.
- Les règles de dessin Alliance peuvent être assimilées aux règles d'une technologie  $1\mu\text{m}$ .

# Les règles de dessin Alliance

Drawing by Xavier LELoup DESS 99-00



# Problèmes à venir...

---

- Les technologies symboliques ont été définies en supposant que les seules règles étaient des valeurs minimales pour les distances, largeurs, recouvrement, inclusion et extension.
- Les nouvelles technologies introduisent de nouvelles règles:
  - densité minimale et maximale,
  - largeur maximale,
  - longueur maximale,
  - surface minimale,
  - certains alignements interdits,
  - etc....

Ces règles ne sont pas vérifiées par le vérificateur de règles symboliques...