

Résumé – Fécondation

I. La rencontre gamétique

La fécondation est la fusion de 2 gamètes mâle et femelle haploïdes pour constituer un œuf fécondé dit zygote diploïde 2N : c'est la **restauration de la diploïdie**.

A. Maturation gamétique : les spermatozoïdes

La cytodifférenciation des spermatozoïdes correspond à la **spermiogénèse** (dans le tube séminifère) et la **spermiation** (libération dans la lumière du tube séminifère).

**Formation des spermatozoïdes =
spermiogénèse (création) +
spermiation (libération dans la lumière
des tubes séminifères)**

La **maturation des spermatozoïdes** a lieu dans les voies génitales extra-gonadiques masculines pendant le transit épидидymaire qui dure 10 jours, puis dans les voies génitales féminines (capacitation). L'évolution des spermatides en spermatozoïdes féconds se fait donc en plusieurs étapes : transit épидидymaire (acquisition) + capacitation (expression).

1. Maturation au cours du transit épидидymaire : 10 jours

Elle se déroule au sein du **canal épидидymaire** (longueur de 5 m), constitué d'une tête, d'un corps et d'une queue coiffant ainsi le testicule.

Au niveau de la tête : abouchement des cônes efférents.

Au niveau du corps de l'épididyme :

- Acquisition de la **mobilité linéaire** des spermatozoïdes : androgéno-dépendante, plus exactement dépendante de la testostérone ;

⚠ **Cette mobilité minimale ne permet pas de traverser le corps de l'épididyme.**

- Modification des **molécules membranaires** des spermatozoïdes : présence de nouvelles molécules, notamment PH20 et PH30 = **reconnaissance et fixation à la zone pellucide** lors rencontre avec l'ovule → maintien d'une certaine **décapacitation**, évite que les spermatozoïdes utilisent leur pouvoir fécondant avant la fécondation (protéines épидидymaires acquises mais ne seront actives qu'après) ;
- **Condensation de la chromatine** des spermatozoïdes : protection de l'ADN, devient le moins sensible à son environnement : création de **ponts disulfures** entre **cystéines des protamines** ;
- **Élimination de la gouttelette cytoplasmique** car suite à la spermiogénèse il reste du cytoplasme ;
- Modification de la composition lipidique de la membrane : plus grande stabilité membranaire (**stéroïls > phospholipides**) afin de résister au transit dans les voies génitales féminines.

Au niveau de la queue de l'épididyme : **stockage des spermatozoïdes immobiles, répression du pouvoir fécondant** à fin transit épидидymaire par :

- Fixation sur la membrane plasmique de la **molécule épидидymaire** : **exemple HE1** → stabilité membranaire et blocage réaction acrosomique prématurée car elle doit se faire au niveau du *cumulus oophorus*, spermatozoïde **non fécondant** si faite plus tôt ;
- Répression du pouvoir fécondant aussi liée à l'environnement car pression importante exercée sur le spermatozoïde.

Pendant transit épидидymaire : acquisition par les spermatozoïdes d'une partie des **capacités fonctionnelles nécessaires à la fécondation**. Mais ne sont **pas activées pour éviter une utilisation prématurée du pouvoir fécondant**.

2. Capacitation proprement dite : 5h

Transformation éphémère et réversible du spermatozoïde éjaculé jusqu'alors non fécondant in vivo : il y a alors ré-acquisition de la capacité à féconder.

La capacitation est **réversible** car il y a une acquisition du pouvoir fécondant dans l'épididyme, mais **masqué** (HE1). Il s'agit d'une **transformation éphémère** car on a un « démasquage » du pouvoir fécondant déjà acquis dans les voies génitales féminines par élimination du plasma séminal et modification de la membrane plasmique du spermatozoïde.

But de la capacitation :

- Rendre le spermatozoïde fécondant ;
- Acquisition d'un mouvement hyperactif ;
- Capacité du spermatozoïde à effectuer sa réaction acrosomique ;
- Capacité à reconnaître la zone pellucide qui entoure.

Mécanisme de la capacitation :

- Élimination du plasma séminal ;
- Remaniement de la membrane plasmique des spermatozoïdes :
 - démasquage d'antigènes de surface impliqués dans la reconnaissance des gamètes ;
 - adsorption / excrétion des protéines inhibitrices de la réaction acrosomique (HE1) acquises lors du transit épидидymaire ;
 - formation de régions membranaires instables dépourvues de protéines (inversion du rapport phospholipides > stérols) ;
- **Élimination de résidus glucidiques présents au niveau de la membrane plasmique des spermatozoïdes.**

Conséquences de la capacitation :

- Démasquage des récepteurs spermatiques utiles par la suite ;
- Fluidification de la membrane due à l'inversion du rapport stérols / phospholipides qui la rend plus perméable ;
- **Afflux de Ca^{2+} intracellulaire** (permis par l'instabilité membranaire qui facilite les échanges) :
 - acquisition du **mouvement hyperactif sinusoïdal** (différent du mouvement linéaire du transit épидидymaire) des spermatozoïdes, nécessaire à la fécondation notamment pour la réaction acrosomique ;
 - réaction acrosomique irréversible ;
 - fusion membranaire.

In vitro, il faut imiter la capacitation permise in vivo par les voies génitales féminines. Pour cela, on :

- Crée une capacitation après élimination du plasma séminal ;
- Effectue un lavage ;
- Fait migrer sur des milieux filtrants avec des gradients de densité.

Les spermatozoïdes vont traverser l'ensemble de ces milieux et vont être capités.

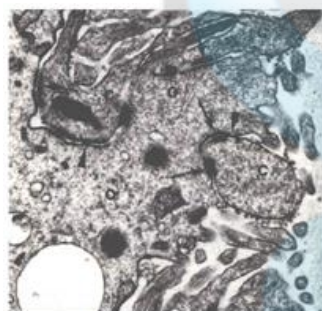
Il s'agit d'un phénomène réversible car lorsqu'on remet du plasma séminal les spermatozoïdes ne sont plus capités.

B. Maturation gamétique : les ovocytes

Un processus de maturation est aussi nécessaire pour les ovocytes qui sont toujours bloqués en diplotène de prophase I depuis la vie fœtale jusqu'à l'ovulation. En effet la reprise de la méiose a lieu 12h avant l'ovulation et 24h après le pic de LH.

On retrouve 2 étapes de maturation pour l'ovocyte qui vont se faire en parallèle :

- **Maturation nucléaire** par levée d'inhibition suite à la rupture des jonctions communicantes entre les cellules folliculeuses et l'ovocyte avec émission



▶ Jonction perméable
— Jonction adhérente

Microscopie électronique
Ovocyte – cellules de la corona radiata

du 1^{er} GP (N2C) et blocage de l'ovocyte II (N2C) en métaphase II. Le Globule Polaire émis va se retrouver au niveau de l'espace péri-vitellin (entre l'ovocyte et la Zone Pellucide) ;

- **Maturation cytoplasmique** par migration des granules corticaux (d'origine



→ Ponts entre la membrane des vésicules et la face interne de la membrane cytoplasmique de l'ovocyte

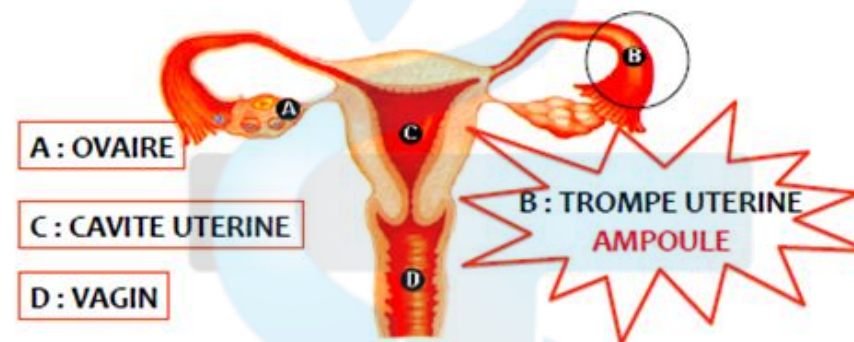
Granule cortical

Microscopie électronique
Ovocyte – cellules de la corona radiata

golgienne) en périphérie de l'ovocyte. Il va y avoir la mise en place de pont entre la membrane de vésicules et la face interne de la membrane cytoplasmique de l'ovocyte.

C. Lieu de la fécondation : tractus génital féminin

Le tractus génital féminin est composé de 4 zones : le vagin, l'utérus, les trompes et les ovaires.



Le tractus génital féminin.

La fécondation a lieu dans les trompes utérines (ou trompes de Fallope), plus précisément au niveau de l'ampoule. Il va donc falloir que les spermatozoïdes migrent jusque-là.

La trompe est composée de 4 parties :

- **Jonction utéro-tubaire** : segment interstitiel ;
- **Isthme** ;
- **Ampoule** : lieu de la fécondation, segment le plus large ;
- **Pavillon** qui coiffe les ovaires afin de capter le cumulus oophorus lors de l'ovulation.

D. Migration des spermatozoïdes

1. Traversée du vagin

200 à 300 millions de spermatozoïdes déposés au fond du vagin et de l'exocol à l'insémination → Phénomène de coagulation.

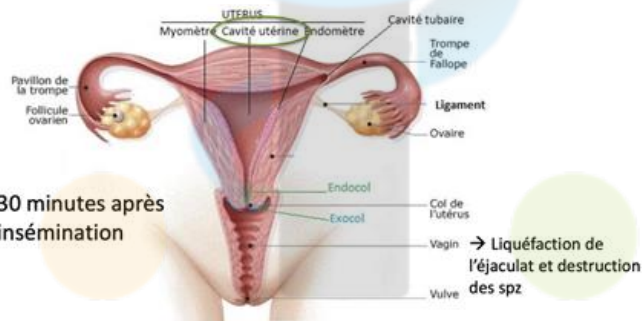
Spermatozoïdes doivent franchir le mucus cervical :

- Vitesse des sz = **5 mm/min** → **30 minutes plus tard seul 1 %** aura franchi la glaire cervicale après **liquéfaction du coagulum** = **2 à 3 millions de spermatozoïdes** au niveau de la cavité utérine ;
- Dans la trompe dans l'heure suivant le rapport, restent jusqu'à **48h**.

L'endocol est le premier filtre avec le **mucus cervical** sécrété par ses cellules (col = endocol + exocol). Mucus cervical = filtre **oestrogéno-dépendant** qui permet de sélectionner les spermatozoïdes les plus mobiles. Il est seulement **perméable de J10 à J14, en période ovulatoire** ce qui permet l'entrée de spermatozoïdes : les mailles du mucus s'élargissent.

La fécondation n'est donc possible qu'aux alentours du **14^{ème} jour** du cycle menstruel.

Les spermatozoïdes peuvent être stockés dans les **cryptes vaginales**, ils y restent stockés en attendant l'ovocyte.

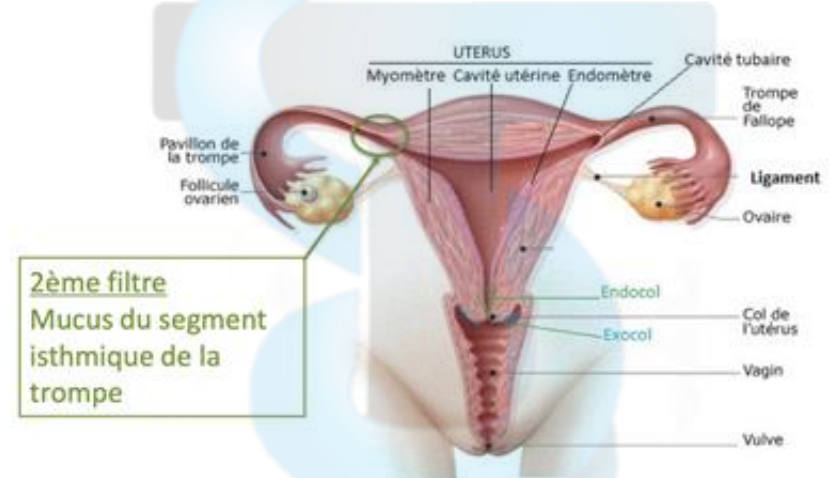


Environ **1% des spz** franchit le mucus cervical soit **2 à 3 millions de spz** dans la cavité utérine

2. Traversée de l'utérus

La traversée de la cavité utérine n'est réalisée que par **2 à 3 millions de spermatozoïdes** qui ont réussi à franchir le mucus cervical.

Au niveau de l'isthme de la trompe, on trouve un deuxième filtre, le **mucus du segment isthmique**, où **plusieurs milliers de spermatozoïdes** s'accumulent plusieurs heures après l'insémination pour ensuite aller jusqu'à la zone de fécondation.



Plusieurs heures après l'insémination

2ème filtre : qq millions de spz

La traversée de l'utérus.

3. Traversée des trompes

Pour finir, les spermatozoïdes doivent franchir le dernier filtre : le cumulus oophorus afin de venir féconder l'ovocyte (partie plus développée dans la suite du cours : traversée du cumulus oophorus).

Au total, il y a 3 filtres :

- Mucus cervical (secrété par les glandes de l'endocol utérin) ;
- Mucus isthmique ;
- Cellules du cumulus.

Au total, il y a 2 réservoirs qui permettent une survie des spermatozoïdes dans l'appareil génital féminin en se nichant dans les cryptes pour se libérer au fil temps :

- Canal cervical et cryptes vaginales ;
- Jonction utéro-tubaire (isthme).

E. Migration de l'ovocyte dans les trompes

Le **cumulus oophorus** (= massif de cellules folliculaires au sein duquel se trouve l'ovocyte entouré par la zone pellucide) est capté par les franges du pavillon de la trompe après son expulsion de l'ovaire, physiquement il s'agit de 2 éléments assez proches.

Le cumulus progresse jusqu'à l'ampoule tubaire passivement où une muqueuse le retient.

Cette **progression passive** est assurée par :

- Les **mouvements du liquide péritonéal** ;
- Le **péristaltisme intrinsèque tubaire** (= contraction des cellules musculaires lisses de la paroi des trompes) ;
- Les **battements ciliaires** de l'épithélium tubaire.

II. Interaction gamétique

A. Traversée du cumulus oophorus

À ce stade, on est dans l'ampoule tubaire : ovocyte II bloqué en métaphase II (*2^{ème} blocage de méiose*) au sein du *Cumulus Oophorus* et spermatozoïdes hyperactifs après capacitation dans voies génitales féminines.

Pendant ils possèdent un acrosome encore intact, c'est-à-dire que la réaction acrosomique n'a pas encore été réalisée.

Seuls les spermatozoïdes capités avec une hyperactivité et dont l'acrosome est intact sont féconds.

On observe la pénétration des spermatozoïdes dans le massif des cellules folliculeuses, moins de **10h après l'ovulation** grâce à certains phénomènes :

- **Hyperactivité** du spermatozoïde capité ;
- **Sécrétion d'enzymes** dont l'acrosine et la **hyaluronidase** par des spermatozoïdes qui ont réalisé **leur réaction acrosomique spontanément**, facilitant ainsi le passage d'autres spermatozoïdes en lysant l'acide hyaluronique car les cellules folliculaires du cumulus oophorus sont rendues solidaires par de l'**acide hyaluronique** (matrice d'acide hyaluronique secrétée par les cellules de la corona radiata).

→ **Entraide** entre les spermatozoïdes car le spermatozoïde fécondant ne parvient à l'ovocyte que grâce à la réaction acrosomique spontanée et précoce de quelques spermatozoïdes avant le complexe Cumulo-Ovocytaire ainsi que la réaction acrosomique réalisée par d'autres spermatozoïdes au niveau de la Zone Pellucide par fixation des spermatozoïdes à ZP3 + ZP4.

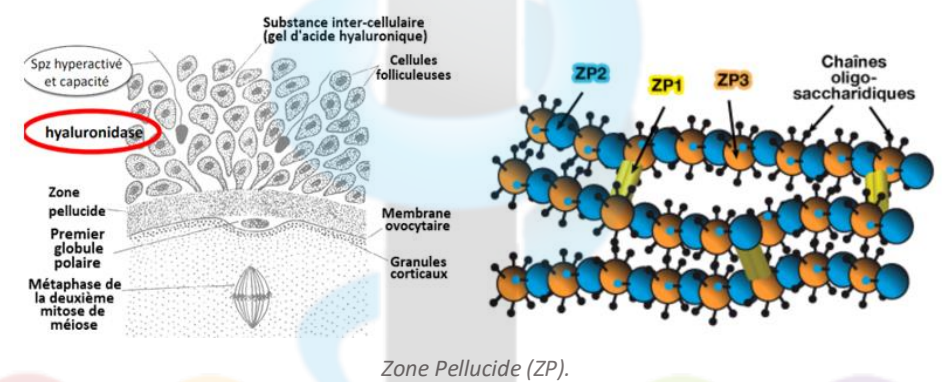
B. Traversée de la Zone Pellucide (ZP)

La zone pellucide est une membrane autour de l'ovocyte composée de **4 glycoprotéines (ZP1, ZP2, ZP3 et ZP4)**. Ce sont des chaînes oligosaccharidiques avec ZP2 et ZP3 qui forment un polymère, formant de longues chaînes, et qui sont reliées par ZP1.

ZP4 est une glycoprotéine mineure qui a été découverte il y a peu de temps et joue un rôle dans environ 10 % de la réaction acrosomique.

Les glycoprotéines ZP2 & ZP3 possèdent des ramifications spécifiquement reconnues par les spermatozoïdes de l'espèce : on parle d'**homospécificité** de la fixation des spermatozoïdes à la ZP par la réaction ligand / récepteur. Cela permet la spécificité et le maintien de l'espèce.

⚠ Seuls les spermatozoïdes dont la membrane plasmique est intacte peuvent se fixer à la zone pellucide.



1. Fixation primaire des spermatozoïdes à la zone pellucide

La liaison primaire est de type **ligand-récepteur**, elle assure la **spécificité de l'espèce** (fixation si reconnaissance entre le ligand et le récepteur, assurée par la présence d'antigènes spécifiques à la surface du spermatozoïde : **homospécificité**) :

- Ligand : **glycoprotéine ZP3** (par les chaînes latérales saccharidiques de type **N-acétyl-glucosamine**) de la zone pellucide ;
- Récepteurs : **enzymes de type galactosidase** au niveau de la membrane cytoplasmique du spermatozoïde.

La liaison primaire, entre les ZP3 et les récepteurs de la membrane plasmique des spermatozoïdes, est réversible.

2. La réaction acrosomique

C'est une fusion membranaire irréversible de la membrane plasmique du spermatozoïde et de la membrane externe de l'acrosome.

À la suite de la fixation primaire, on observera :

- Agrégation des **récepteurs membranaires** au niveau de la membrane plasmique des spermatozoïdes ;
- Activation des voies de transmission intracellulaire ;
- **Afflux de Ca²⁺** intra cellulaire qui déclenche la **réaction acrosomique**.

➔ **Processus d'exocytose** : libération du contenu acrosomique (acrosine qui hydrolyse la ZP1 et libère les filaments ZP2-ZP3, hyaluronidase, acétylglucosaminidase) et externalisation de membrane interne de l'acrosome.

Tous les spermatozoïdes n'effectuent pas la réaction acrosomique, il faut qu'ils aient franchi toutes les étapes précédentes.

3. Fixation secondaire et traversée de la zone pellucide

La liaison secondaire est de type ligand-récepteur, elle est irréversible.

On a :

- Ligand : chaînes polysaccharidiques de **ZP2** ;
- Récepteurs des molécules d'adhésion SPAM (*sperm adhesion molecule* + GPI = glyosylphosphatidylinositol) sur la membrane interne de l'acrosome.

PH20 est une protéine de reconnaissance de la ZP, c'est une enzyme de surface qui migre vers la membrane interne de l'acrosome.

4. Traversée de la zone pellucide

Finalement la fixation primaire, la réaction acrosomique et la fixation secondaire permettent la traversée de la zone pellucide grâce à :

- **Dissociation** de la ZP : **lyse** de certaines de ses molécules par les enzymes de l'acrosome ;
- **Mouvement hyperactif** des spermatozoïdes capités.

5. Fusion membranaire

Le premier spermatozoïde capité ayant traversé la zone pellucide arrive dans l'**espace péri-vitellin** (entre la zone pellucide et la membrane plasmique) et va s'y **immobiliser** en se positionnant **tangentiellement** à la membrane cytoplasmique de l'ovocyte.

Moins de 2h après la fécondation (= traversée du cumulus oophorus) se déroule la **fusion membranaire** :

- Fusion de la **membrane de la cape post-acrosomique** du spermatozoïde avec la **membrane cytoplasmique** de l'ovocyte ;
- Cela déclenche l'**activation de l'ovocyte** avec une reprise de la méiose II, 6 à 7h après la fécondation et l'émission du 2nd globule polaire dans l'espace péri-vitellin.

⚠ La totalité du spermatozoïde pénètre dans le cytoplasme de l'ovocyte.

Au niveau membranaire, la fusion se fait entre :

- Membrane de l'ovocyte (au niveau des microvillosités) : **intégrines** ;
- Membrane de la cape post-acrosomique du spermatozoïde : protéines (**PH30 = fertiline**, ou fertiline : sous-unité β d'un dimère $\alpha\beta$ (*ADAM : α desintegrin metalloprotease*) organisées en dimères $\alpha\beta$:
 - SU β : **désintégrines** qui interagissent avec les intégrines à la surface de l'ovocyte et permettent la fixation du spermatozoïde ;
 - SU α : **peptide de fusion** qui permet la fusion des membranes moins de 2h après la fécondation.

C'est le cas pour l'espèce humaine mais pour d'autres espèces c'est la même molécule qui permet la fixation et la fusion.

Finalement, au niveau moléculaire on a donc liaison entre :

- **Intégrines** de la membrane de l'ovocyte ;
- **Désintégrines** de membrane de cape post- acrosomique du spz.

III. Activation de l'œuf

La fusion membranaire des gamètes va entraîner un **afflux de Ca^{2+} intracellulaire ovocytaire**, qui va permettre la **réaction corticale**.

A. Réaction corticale

Dans l'ovocyte se trouvent des **granules corticaux** en périphérie sous la membrane plasmique (cf. maturation cytoplasmique) : l'afflux de Ca^{2+} déclenche l'**exocytose des granules corticaux** et la libération des enzymes qu'ils contiennent dans l'espace péri-vitellin → c'est la **réaction corticale**.

Elle permet l'imperméabilisation de la ZP à tous les spermatozoïdes, elle permet d'éviter la polyspermie.

Les cas de **triploïdie** (voire de polyploïdie) sont presque toujours non viables à terme mais engendrent les premières divisions cellulaires, elles sont dues soit :

- À la **fusion en même temps de 2 spermatozoïdes** (ou plus : polyplôidie) ;
- À la **réaction corticale défectueuse** qui n'imperméabilise pas correctement l'imperméabilisation de la ZP.

Ce phénomène permet l'imperméabilisation de la zone pellucide à d'autres spermatozoïdes : la réaction corticale secondaire à la fusion membranaire des gamètes empêche la polyspermie (= fécondation de l'ovocyte par plusieurs spermatozoïdes).

B. Reprise de la méiose : 6 à 7 heures après la fécondation

La fusion membranaire des gamètes entraîne l'activation de l'ovocyte :

- L'ovocyte qui était bloqué en métaphase II, reprend et termine sa méiose ;

- On a alors **émission du 2^{ème} globule polaire** (NC) dans l'espace péri-vitellin : il permet de réduire de moitié la quantité d'ADN maternel. L'ovocyte se divise en 2 et devient alors entièrement **haploïde** : NC.

On aura alors la formation des **2 pronoyaux**.

C. Formation des pronoyaux

La formation des pronoyaux (haploïdes NC) a lieu après la reprise et l'achèvement de la méiose II de l'ovocyte (soit 6-7h après la fécondation).

- **Pronoyau femelle et 2^{ème} globule polaire** : reconstitution d'une membrane nucléaire autour du pro noyau après la méiose ;
- **Pronoyau mâle** :
 - dispersion du contenu du spermatozoïde et phagocytose du spz ;
 - dissolution mb nucléaire du spz et décondensation de chromatine ;
 - gonflement du noyau ;
 - disparition des mitochondries, du flagelle et du centriole distal du spermatozoïde, persistance du centriole proximal → spermaster ;
 - constitution d'une nouvelle enveloppe nucléaire.

Le pronoyau mâle provient de la tête du spermatozoïde, dont la pièce intermédiaire et le flagelle se sont disloqués. Les mitochondries paternelles disparaissent lors de la fécondation : les **mitochondries** de l'embryon sont **uniquement d'origine maternelle**.

Disparition centrioles d'origine maternelle + dédoublement du centriole proximal paternel → rapprochement progressif des pronoyaux, fin de méiose et constitution d'une nouvelle cellule diploïde.

IV. Amphixie : 12 à 18h après fécondation

Réplication de l'ADN dans chaque pronoyau et rapprochement des pronoyaux grâce aux microtubules du spermaste, puis **prophase** dans chaque pronoyau (moins de 18h après la fécondation). On ne peut pas distinguer le pronoyau mâle du pronoyau femelle.

Amphimixie : stade où les 2 pronoyaux sont accolés, mais ils ne fusionnent pas. Les centrioles sont proches de la zone d'accolement et vont former le fuseau de division.

V. Première division de l'œuf : le zygote

Préparation de la division cellulaire qui aboutira à la formation du zygote :

- Phase S = réplication d'ADN dans chaque pronoyau → pronoyaux N2C ;
- Phase G2 : très courte ;
- Prophase avec condensation de la chromatine :
 - formation du fuseau mitotique grâce au centriole proximal ;
 - disparition des enveloppes nucléaires des pronoyaux : **syngamie**, avec disparition des pronoyaux qu'on ne pourra plus voir du fait de la disparition de leurs enveloppes ;
- Métaphase de la 1^{ère} mitose de segmentation : mélange des chromosomes paternels et maternels (≈ **30h après la fécondation**).

Après la mitose (≈ **36h après la fécondation**), on aboutit à 2 cellules-filles = 2 **blastomères** de taille différentes mais possédant le même contenu génétique. Il faut cependant que ce soit une petite différence de taille entre les blastomères : sinon c'est un embryon atypique.

Présence des 2 globules polaires qui disparaissent petit à petit, en périphérie la zone pellucide persiste à ce stade.

VI. Conséquence de la fécondation

La fécondation permet :

- **Activation de l'ovocyte** : au niveau cytoplasmique, **réaction corticale** et au niveau nucléaire, **reprise de la méiose** ;
- Restauration de la **diploïdie** ;
- **Déterminisme du sexe génétique** par apport de chromosome X ou Y par le spermatozoïde ;
- **Amphimixie, syngamie** et **1^{ère} division du zygote** : marquent la **fin de la fécondation**.

Le cytosquelette (**spermaste**) est formé à partir des microtubules du centriole proximal du spermatozoïde, il permet le rapprochement des pronoyaux et la première division de mitose.

VII. Anomalie de la fécondation

A. Polyploïdie

Les **polyploïdies** (anomalie du nombre de N) les plus fréquentes sont les **triploïdies** (cellules à 3N chromosomes. Elles peuvent être dues à :

- **Diandrie** : si **2 spermatozoïdes** fécondent l'ovocyte en même temps ou s'il y a **réaction corticale défectueuse** qui n'empêche pas la dispermie ;
- **Digynie** : s'il y a un défaut de maturation de l'ovocyte avec **non-expulsion du 2^{ème} globule polaire**.

Fréquence des triploïdies plus élevée en FIV (fécondation in-vitro) : 5 % contre 1 à 2 % in vivo.

B. Aneuploïdie : anomalie du nombre de chromosome

Les **aneuploïdies** sont des anomalies du nombre de chromosomes découlant d'une anomalie portée par un des gamètes suite à une **non-disjonction** des chromosomes lors de la 1^{ère} ou 2^{ème} division de méiose.

On retrouve par exemple :

- **Trisomie** (syndrome de Down = trisomie 21) : excès de chromosome (un des deux gamètes est disomique) ;
- **Monosomie** : déficit de chromosome (un des deux gamètes est nullosomique) ; non viable quand elle concerne les autosomes ;
- **Anomalies du nombre de chromosomes sexuels** :
 - **syndrome de Turner (45, X0)** : femme stérile de petite taille; seule monosomie viable: absence de X létale donc 45,Y0 non viable ;
 - **syndrome de Klinefelter (47, XXY)** : homme (stérile) de grande taille.

		OVOCYTE		
		23, X	24, XX	22, 0
S P E R M A T O	23, X	46, XX	47, XXX	45, X0
	23, Y	46, XY	47, XXY	45, Y0
	24, XY	47, XXY	48, XXXY	46, XY
	24, XX	47, XXX	48, XXXX	46, XX
	24, YY	47, XYY	48, XXYY	46, YY
	22, 0	45, X0	46, XX	44, 00

Non-disjonction des chromosomes sexuels.

On a :

- **En bleu** : caryotype normaux (*les deux 46, XX et 46, XY*) ;
- **En jaune** : caryotypes anormaux qui donnent des phénotypes anormaux mais viables comme les syndromes de Turner et de Klinefelter ;
- **En blanc** : plus rares, caryotypes anormaux qui n'entraînent pas forcément de phénotypes anormaux ;
- **En rouge** : caryotypes non viables, la présence de X est indispensable à la survie (les trois caryotypes sans X de la rangée de droite).

C. Le développement parthénogénétique

Phénomène où seuls les chromosomes paternels ou maternels s'expriment : cela correspond à une **reproduction monoparentale**. On retrouve :

- **Tératome ovarien** : développement de 2 lots haploïdes féminins. Il y a activation d'ovocytes non fécondés : l'ovocyte s'auto-active. Ce développement correspond à une tumeur bénigne ;
- **Môle hydatiforme** : 2 lots haploïdes masculins. Elle est liée à :
 - un spermatozoïde resté à 2N ou ayant dupliqué ses chromosomes ;
 - deux spermatozoïdes ayant fécondé un ovocyte et en l'absence d'expression du matériel génétique maternel.