

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université Abderrahmane Mira-Bejaia

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département de Biologie Physico-chimique
Spécialité Génétique fondamentale et appliquée



Mémoire de Fin de Cycle
En vue de l'obtention du diplôme de
MASTER

Thème

Contribution à l'analyse cytogénétique comparative
entre deux Galliformes : la caille japonaise *Coturnix*
japonica et la perdrix choukar *Alectoris chukar*

Présenté par :

BEDOUHENE Khadra
Soutenu le : 30 Septembre 2021

Devant le jury composé de :

Mr Zaidi Hicham
M^{me} Benmessaoud Yasmine
M^{me} Berboucha Meriem

Président
Promotrice
Examineur

Année universitaire : 2020/ 2021



Dédicaces

À ceux que j'aime surtout

***Mes chers parents** qui m'ont toujours soutenu dans mes choix et qui ont tout mis en œuvre pour que je puisse mener à bien mes études. Merci pour tout ce que vous m'avez transmis, pour votre soutien, vos encouragements et votre confiance en moi, vous êtes un exemple pour moi, je vous en serai toujours reconnaissante.*

***Mes frères et ma sœur** qui sont toujours là pour m'aider et rendre ma vie agréable.*

***Ma moitié** la personne qui comprend le plus ce que j'ai vécu pendant ces dernière années. Je t'aime beaucoup !*

***Tous les membres de la grande famille.** Merci d'avoir savouré avec moi votre générosité et votre indulgence qui m'ont été très précieux, et signifient bien plus pour moi que je ne saurai jamais l'exprimer.*

***Mes meilleurs amis(es)** pour leur soutien sans faille et permanent. Toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin.*

À vous tous je dédie ce modeste travail



Khadra

Remerciements

Je remercie Dieu, Le Tout-puissant et miséricordieux, de nous avoir donné la santé et la volonté pour accomplir ce modeste travail
EL HAMD OU LILLAH

*J'adresse mes remerciements les plus sincères et les plus chaleureux à ma promotrice, **Mme Kartout-Benmessaoud Y.***

Je la remercie tout d'abord pour m'avoir fait confiance, ensuite pour ces conseils précieux, ses orientations judicieuses, ses directives efficaces, sa patience et sa gentillesse. Qu'elle trouve ici l'expression de notre profonde gratitude.

Je remercie aussi :

***Mr ZAIDI H.** d'avoir accepté de présider*

***Mme Berboucha M.** d'avoir accepté d'examiner et de valoriser mon travail*

Je remercie ainsi toute personne qui m'a soutenue de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Sommaire	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Liste des abréviations	

Sommaire

Introduction

Chapitre I : étude bibliographique

Partie 1 : la caille japonaise <i>Coturnix japonica</i>	1
I 1-Rappel général sur les cailles	1
I 1-1 Biologie de la caille japonaise <i>Coturnix japonica</i>	1
I 1-2 Classification systématique	1
I 1-3 Habitat et répartition géographique	2
I 1.3.1 Habitat	2
I 1.3.2 Distribution géographique	2
I 1-4 Origine et domestication de la caille japonaise	3
I 1-5 Caractéristiques morphologiques	3
I 1.5.1 Morphologie	3
I 1.5.2 Plumage	3
I 1.5.3 Dimorphisme sexuelle	3
I 1.5.4 Sexage	4
I 1-6 La reproduction de la caille japonaise	4
I 1-7 Alimentation des cailles	5
I 1-8 Description des œufs de la caille japonaise	5
Partie 2 : <i>Gallus gallus domesticus</i>	6
I 2-1 Présentation de l'espèce <i>Gallus gallus domesticus</i>	6

I 2-2 Origine de l'espèce <i>Gallus gallus domesticus</i>	6
I 2-3 Classification phylogénétique de <i>Gallus gallus domesticus</i>	7
I 2-4 Domestication de <i>Gallus gallus domesticus</i>	7
I 2-5 Habitat naturel	8
I 2-6 Alimentation.....	8
I 2-7 Morphologie.....	9
Partie 3 : la perdrix choukar <i>Alectoris chukar</i>	
I 3-1 Généralités sur une espèce apparentée : la perdrix choukar <i>Alectoris</i> <i>Chukar</i>	9
I 3-2 Caractéristiques morphologiques et plumage.....	11
I 3-3 Reproduction.....	12
Chapitre II : Cytogénétique et remaniements chromosomiques	
II-1 Cytogénétique.....	13
II.1.1 Cytogénétique classique ou conventionnelle.....	13
II.1.2 Cytogénétique moléculaire	14
II.1.2.1 Hybridation <i>in situ</i> en fluorescence (FISH).....	14
II.1.2.2 Puce à ADN	15
II.1.2.3 Hybridation génomique comparative (CGH).....	15
II-2 Nomenclature et classification des chromosomes métaphasiques.....	16
II.2.1 Structure du chromosome métaphasique.....	16
II-3 Mutations génétiques.....	17
II-4 Anomalies chromosomiques	18
II.4.1 Anomalies de nombre.....	18

II.4.2 Anomalies de structure.....	18
II.4.2.1 Anomalies de structure touchant un seul chromosome.....	19
II.4.2.2 Anomalies de structure touchant deux chromosomes.....	20
II-5 Le génome aviaire.....	21
II-6 Macrochromosomes et Microchromosomes.....	22
II-7 Le poulet comme modèle aviaire.....	22
II-8 Chromosomes sexuels.....	23
II-9 Caryotypes de quelques espèces apparentées	24
II.9.1 Caryotype du poulet domestique <i>Gallus gallus domesticus</i>	25
II.9.2 Caryotype de la caille japonaise <i>Coturnix japonica</i>	26
II.9.3 Caryotype de la perdrix choukar <i>Alectoris chukar</i>	26.
Chapitre III : Analyse chromosomique comparative entre la caille japonaise, du poulet domestique et la perdrix choukar	
III-1 Analyse bibliographique comparée des chromosomes du poulet domestique <i>Gallus gallus domesticus</i> avec ceux de la caille japonaise <i>Coturnix japonica</i> et la perdrix choukar <i>Alectoris chukar</i>	27
III-2.1 Comparaison chromosomique entre la caille japonaise <i>Coturnix japonica</i> et la perdrix choukar <i>Alectoris chukar</i>	31
Comparaison morphométrique.....	31
III-3 Réarrangements proposés entre la caille japonaise et la perdrix choukar...	34

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau 1 : systématique de la caille japonaise2

Chapitre III

Tableau 2 : Analyse comparative de la morphologie des macrochromosomes et des gonosomes ZW des trois espèces de galliformes et les éventuels réarrangements chromosomiques proposés.....31

Tableau 3 : Morphométrie des chromosomes de la perdrix choukar *Alectoris chukar*32

Tableau 4 : Morphométrie des chromosomes de la caille japonaise *Coturnix japonica*.....32

Liste des figures

Chapitre I

Figure 1 : Aires de distribution de la caille japonaise (Bleu) et ceux de la caille commune.....	2
Figure 2 : Couple de caille japonaise adulte, (a) Femelle, (b) Mâle.....	4
Figure 3 : Les œufs de caille sont cinq fois plus petits que celui d'une poule	6
Figure 4 : Les poules.....	8
Figure 5 : Morphologie de coq (à gauche) et de poule (à droite).....	9
Figure 6 : <i>Alectoris chukar</i>	10
Figure 7 . Distribution globale de la perdrix choukar (<i>Alectoris chukar</i>).....	11
Figure 9 . Morphologie externe de la perdrix choukar adulte	12

Chapitre II

Figure 10 : Technique de l'hybridation <i>in situ</i> en fluorescente. (A) : sonde. (B) : sonde colorée à l'aide d'un fluorochrome. (C) : hybridation avec l'ADN nucléaire. (D) : apparence du chromosome métaphasique où la sonde s'est fixée	14
Figure 11 : Différents types de sondes utilisées en hybridation <i>in situ</i>	15
Figure 12 : Principe de l'Hybridation génomique comparative classique	16
Figure 13 : Classification des différents types de chromosomes en fonction de la position relative de leur centromère	17
Figure 14 : Anomalies chromosomiques de structure apparaissant entre deux chromosomes (A) délétion, duplication, inversion. Inversion péricentrique (B) et paracentrique (C), qui seraient impliquées dans l'évolution du caryotype aviaire	19
Figure 15 : Réarrangements chromosomiques équilibrés (A, B, C et D).....	21
Figure 16 : Organisation typique en macro- / micro-chromosomes de certains caryotypes aviaires en coloration conventionnelle	24
Figure 17 : Caryotype de la poule domestique <i>Gallus domesticus</i> en coloration conventionnelle (A) : Mâle, (B) : Femelle	25

Figure 18 : (A) Caryotype en bandes GTG. (B) Idiogramme standard des 8 premières paires chromosomiques et les chromosomes Z et W de la poule domestique *Gallus gallus domesticus*25

Figure 19 : Caryotype partiel en bandes GTG de la caille japonaise *Coturnix japonica* de sexe (A) mâle et (B) femelle26

Figure 20 : Caryotype partiel de la perdrix choukar mâle en bandes (A) morphologiques GTG et (B) RHG

Chapitre III

- Figure 21 :** Comparaison des huit premiers macrochromosomes ainsi que les deux gonosomes entre le poulet domestique *Gallus gallus domesticus* et la caille japonaise *Coturnix japonica*30
- Figure 22 :** comparaison des huit premiers macrochromosomes ainsi que les deux gonosomes entre le poulet domestique *Gallus gallus domesticus* et la perdrix choukar *Alectoris chukar*....31
- Figure 23 :** comparaison des huit premiers macrochromosomes ainsi que les deux gonosomes entre la caille japonaise *Coturnix japonica* et la perdrix choukar *Alectoris chukar*.....35
- Figure 24 :** la comparaison des motifs des bandes GTG entre le chromosome 4 (à gauche) ainsi que les idiogrammes correspondant (à droite) dans le sens caille japonaise et perdrix choukar..... 36
- Figure 25 :** Inversion péricentrique qui aurait pu se produire sur les chromosomes 4 ancestraux de la caille japonaise et de la perdrix choukar36
- Figure 26 :** Comparaison des motifs de bandes GTG des chromosomes 4 de la caille japonaise et la perdrix choukar..... 36
- Figure 27 :** Inversion péricentrique dans le sens perdrix choukar et la caille japonaise37
- Figure 28 :** Comparaison des bandes GTG des chromosomes 8 du poulet domestique de la caille japonaise et la perdrix choukar (originale)..... 37
- Figure 29 :** Repositionnement du centromère (ENC : Evolutionary New Centromer) qui se serait produit sur le chromosome 8 ancestral de la caille japonaise au cours de l'évolution (originale)..... 38
- Figure30 :** (A) Comparaison entre les chromosomes 8 de la perdrix choukar et de la caille japonaise. (B) formation probable d'un néocentromère sur le chromosome 8 ancestral de la perdrix choukar38
- Figure 31 :** (A) comparaison des chromosomes w entre la caille japonaise et le perdrix choukar. (B) apparition d'un neocentromere sur le chromosome W ancestral de la caille japonaise39
- Figure 32 :** (A) Comparaison de chromosome W entre la perdrix choukar et la caille japonaise. (B) formation d'un néocentromère sur le chromosome W ancestral de la perdrix choukar (flèche bleue) ou bien sur celui de la caille japonaise (flèche verte).39
- Figure 34 :** Représentation schématique des différents événements de réarrangements qui se seraient déroulés lors de l'évolution des chromosomes du poulet (proche du caryotype ancestral, et ceux de l'outarde houbara, la perdrix gabra, la perdrix choukar, la caille des blés et la caille japonaise. (Mahieddine, 2020)..... 44

Liste des abréviations

- 2n** : Nombre diploïde des chromosomes
- ADN** : Acide DésoxyriboNucléique
- BAC**: Bacterial Artificial Chromosome
- Cj**: caille japonaise *Coturnix japonica*
- FISH**: Fluorescence *In situ* Hybridization
- GGA**: poulet domestique *Gallus gallus domesticus*
- GTG**: Bandes G (G-Trypsine Giemsa)
- Ach** : perdrix choukar *Alectoris chukar*
- p**: bras court d'un Chromosome
- q** : Bras long d'un Chromosome
- Mb** : Méga base
- Mpb** : Méga paire de base
- Invr Para** : Inversion paracentrique
- Invr Péri** : Inveersion péricentrique
- NC** : Néocentromére
- RBG** : (Reverse-BrdU-Giemsa)
- SNP** : Simple Nucléotide Polymorphisme
- UICN** : Union Internationale de la Conservation de la Nature
- %** : pourcentage
- °C** : Degré Celcius
- IC** : Indice Centromirique
- BAC** :Bacterial Artificial Chromosome
- ENC** :Evolution New centromere

Introduction



Introduction

Les oiseaux représentent une classe de vertébrés tétrapodes qui contient une variété diversifiée d'espèces (plus de 10 500) (**Jarvis et al., 2014**). Ils sont largement utilisés comme modèles d'études dans divers domaines telles que la génétique des populations (**Granevitze et al., 2007**), la neurobiologie (**Self, 2003**) et la biologie du développement (**Burt, 2007**). Les génomes des oiseaux sont petits, même s'ils détiennent généralement un grand nombre de chromosomes. Cependant, la quantité de chromosomes présente à l'intérieur de leur noyau diffère d'une espèce à l'autre (**Axelsson et al., 2005 ; Zhang et al., 2014**).

Des études approfondies concernant les oiseaux ont été entreprises par des chercheurs en biologie du développement et en cytogénétique animale, avec plus de 1000 caryotypes aviaires publiés (**Kartout-Benmessaoud et Ladjali-Mohammedi, 2018 ; Ouchia-Benissad, 2019 ; Mahiddine ; 2020**).

La cytogénétique classique permet de déceler notamment les remaniements chromosomiques de structures à partir de la position des centromères. Ces derniers offrent un intérêt considérable et jouent ainsi un rôle important dans l'évolution (**Yunis et al., 1982**).

En effet, les résultats de la cytogénétique classique complètent les analyses phylogénétiques et permettent de retracer le déroulement de nombreux réarrangements survenus sur les chromosomes ancestraux (**Muffato, 2010**). De ce fait, le concept de «spéciation chromosomique», implique un remodelage du caryotype commun à la suite d'accumulation de mutations combinées à la pression de la sélection (**Deakin et al., 2019**).

Cependant, l'étude cytogénétique est une étape préalable et requise qui constitue une trame sur laquelle se baseront les analyses moléculaires. A plus large échelle, l'assemblage de toutes ces données permettra de comprendre les processus évolutifs complexes du vivant (**Ouchia-Benissad, 2019**).

L'avifaune d'Algérie se caractérise par la présence de 281 espèces d'oiseaux, dont cinq retenues dans la liste rouge de l'UICN. Grâce à sa situation géographique, la diversité de son climat et de ses habitats, l'Algérie présente une grande variété d'écosystèmes et d'espèces animales et végétales (**Moali, 2016**).

La poule domestique (*Gallus gallus domesticus*) représente l'espèce de phasianidés la plus étudiée, dont l'intérêt économique majeur a permis des études précises notamment dans le cadre de la diversité génétique et la cartographie des gènes et des marqueurs moléculaires

Introduction

(Mahammi, 2015). Le poulet domestique représente ainsi le standard des espèces aviaires (Ladjali-Mohammedi *et al.*, 1999).

La caille japonaise *Coturnix japonica* est une espèce aviaire de l'ordre des Galliformes et la famille des Phasianidés. Elle est considérée comme une espèce modèle des laboratoires pour sa petite taille, sa croissance rapide, sa grande production d'oeufs et son élevage peu coûteux (Mills *et al.*, 1997).

La perdrix choukar *Alectoris chukar* est une espèce d'origine Asiatique (Cetin *et al.*, 1997) qui appartient aussi à la même famille des Phasianidae (Cetin et Kirikci, 2000). Elle a été introduite en Algérie depuis près de 50 ans, la domestication et la sélection postérieure des traits de croissance de cette espèce pourraient offrir une excellente protéine à l'alimentation humaine (Queiroz *et al.*, 2004).

Les études comparatives entre la caille japonaise *Coturnix japonica* et le poulet domestique *Gallus domesticus* et entre la perdrix choukar *Alectoris chukar* et le poulet domestique ont permis de déceler certains réarrangements chromosomiques qui auraient pu se produire au cours de l'évolution (Kayang *et al.*, 2006 ; Zlotina *et al.*, 2012 ; Ouchia-Benissad, 2019 ; Kartout-Benmessaoud, 2019). Cependant aucune analyse comparative n'a été rapportée à ce jour entre la caille japonaise et la perdrix choukar.

L'objectif du présent travail vise à établir, pour la 1^{er} fois, une analyse cytogénétique comparative entre la caille japonaise *Coturnix japonica* et la perdrix choukar *Alectoris chukar* en s'appuyant sur leurs descriptions chromosomiques déjà établies respectivement par Kartout-Benmessaoud *et al.* (2018) et Ouchia-Benissad *et al.* (2018).

Cela dans le but de déterminer l'état de conservation de ces deux génomes et de déceler la présence d'éventuels réarrangements intrachromosomique qui se seraient déroulés au cours de l'évolution et de proposer ainsi une hypothèse sur leur divergence phylogénétique.

Chapitre I



Partie 1 : la caille japonaise *Coturnix japonica*

1-Rappel général sur les cailles

Le mot « caille » fait référence à un groupe de petits oiseaux qui s'accroupissent ou courent plutôt que de voler pour échapper au danger. Le mot lui-même signifie « Couler ou trembler de peur ». Ce sont les plus petits de l'ordre des Galliformes. Il existe 40 espèces dans le monde, réparties en deux catégories : les cailles domestiques et les cailles sauvages. Seule la caille du Japon *Coturnix japonica* est domestiquée et élevée dans le monde entier (Prabakaran, 2003).

1-1 Biologie de la caille japonaise *Coturnix japonica*

La caille japonaise appartient à la famille des phasianidés tout comme les faisans et les perdrix, c'est un oiseau fort avec un petit corps, des pattes courtes et des plumes variées (Mondry, 2016). Elle se caractérise par une croissance rapide, une maturité sexuelle précoce, un intervalle de génération court et une production d'œufs importante (Mills *et al.*, 1997).

Les oiseaux ont une forte résistance aux maladies, une productivité élevée et peu de restrictions de reproduction. Les éleveurs de cailles sont appelés coturniculteurs. La caille est élevée pour ses œufs (utilisés pour la nourriture, les décorations et les médicaments) et sa viande est de plus en plus recherchée par les personnes à revenu élevé en Afrique. (Mundry, 2016).

En plus de sa physiologie comparable à celle des humains, la caille japonaise est devenue une norme importante pour d'excellents modèles animaux expérimentaux dans de nombreux domaines de recherche (tels que la biologie du développement et la génétique (Huss *et al.*, 2008 ; Alkan *et al.*, 2010 ; Moula *et al.*, 2014).

1-2 Classification systématique

En 1990, les chercheurs classent la caille japonaise comme une espèce autonome et donnent le nom scientifique actuel *Contrnix japonica* (Tableau 1) (Crawford, 1990) :

Chapitre I Etude bibliographique

Tableau 1 : systématique de caille japonaise (Crawford, 1990) :

Embranchement	Vertébrés
Classe	Oiseau
Ordre	Galliformes
S/Ordre	Gallinacés
Super famille	Phasianoidea
Famille	Phasianidés
Genre	<i>Coturnix</i>
Espèce	<i>Coturnix japonica</i>

1-3 Habitat et répartition géographique

1.3.1 Habitat

Les cailles japonaises vivent souvent dans des habitats ouverts, des cultures, et des clairières. Elle semble être moins sensible à l'humidité car elle existe aussi sur la terre et les marais (Mills *et al.*, 1997 ; Hennache et Ottaviani, 2011).

1.3.2 Distribution géographique

La caille japonaise se retrouve en Mongolie, au sud de la Sibérie, en Chine, en Corée du Sud, au Japon, au nord du Vietnam, au Myanmar et au Bhoutan. En hiver, elle est retrouvée dans le sud de la Chine (Mills *et al.*, 1997). Des observations sur le terrain ont été effectuées en Thaïlande, dans le nord-est de l'Inde, au Cambodge et aux Philippines. La caille japonaise a été introduite à Hawaï et à la Réunion (Figure N°1) (Shwartz *et al.*, 1949 ; Hennache et Ottaviani, 2011).

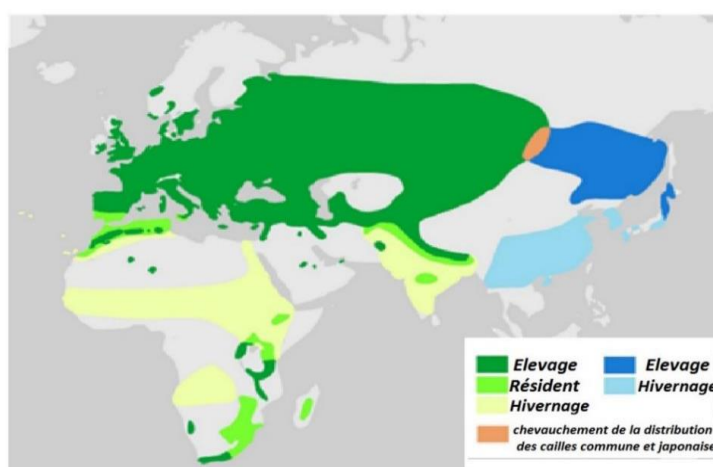


Figure1 : Aires de distribution de la caille japonaise (en bleu) et ceux de la caille commune (en vert) (Birdlife international, 2018).

1-4 Origine et domestication de la caille japonaise

L'histoire de la domestication de la caille japonaise est partagée par la Chine et le Japon. Cette espèce a été introduite au Japon au 11^{ème} siècle (**Hawls, 1964**).

Les cailles domestiques sont apparues pour la première fois en Afrique dans les années 1980 et ont ensuite été introduites par des missionnaires chrétiens (**Shanaway, 1994 ; Vali, 2008**). La caille japonaise a été domestiquée principalement pour produire de sa viande délicieuse et ses œufs riches en vitamines (**Mills et al., 1997**).

1-5 Caractéristiques morphologiques

1.5.1 Morphologie

La caille domestique est un oiseau très court, de forme arrondie avec des ailes courtes et solides. Elle est caractérisée par une petite tête, un bec court et robuste légèrement recourbé à son extrémité et un cou moyennement développé. La queue est généralement courte, les pattes dépourvues d'ergot robuste, sont bien développées avec 3 doigts antérieurs liés à la base par une membrane très fine et un doigt postérieur libre. Egalement, les femelles sont plus volumineuses que les mâles (**Menassé, 1986**).

1.5.2 Plumage

Le plumage de la caille japonaise diffère en fonction de son stade de vie (**Ratnamohan, 1985**). En effet, avant les 3 semaines d'âge, tous les cailleteaux se ressemblent par leur duvet marron et la présence de traits jaunes au milieu du corps (**Woodard, 1973 ; Lucotte, 1975**).

A l'âge adulte, le mâle possède un plumage blanc jaunâtre ou rougeâtre parsemé de quelques plumes brunes sous la gorge alors que pour la femelle, son plumage est gris jaunâtre moucheté de tâches foncées (**Oriol ; (1987)**).

1.5.3 Dimorphisme sexuelle

L'espèce *Coturnix japonica* présente un dimorphisme sexuel. La distinction entre les deux sexes est très claire vu la différence de la couleur des plumes. A partir de la 3^{ème} semaine d'âge, les deux sexes peuvent être distingués par la couleur du plumage de la poitrine (**Oriol, 1987 ; Ayache, 2001**).

En effet, les femelles ont une poitrine pâle tachetée de noir, alors que les mâles se caractérisent par un plumage de poitrine uniforme de couleur brune orangée et c'est la même couleur sur les joues, ce qui est absent chez la femelle (**Figure 2**) (**Mills et al., 1997; Huss et al., 2008**).

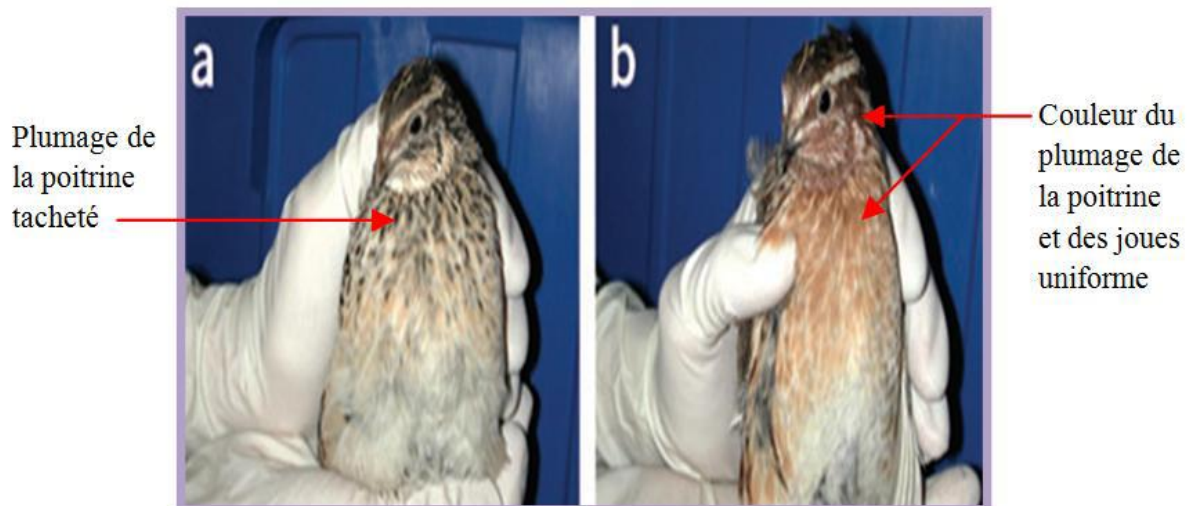


Figure 2: Couple de caille japonaise adulte, (a) Femelle, (b) Mâle (Huss *et al.*, 2008).

1.5.4 Sexage

D'après Oriol (1987) et Ayache (2001) la distinction entre les deux sexes est très claire vu la différenciation de la couleur des plumes, de la forme du corps et du cloaque.

Les mâles adultes ont une glande au niveau du cloaque qui sécrète une substance blanche mousseuse. La taille de cette glande peut être utilisée comme un indicateur externe de la fonction testiculaire chez les oiseaux (Ernest, 1978 ; Ratnamohan, 1985 ; Randall, 2008). La glande cloacale est également utile pour différencier les mâles des femelles des souches ayant un plumage autre que de type sauvage (Shanaway, 1994 ; Baer, 2015).

1-6 La reproduction de la caille japonaise

La caille japonaise commence à atteindre la maturité sexuelle à environ 6 à 8 semaines d'âge. L'adoption du comportement sexuel se traduit chez le mâle par des tentatives d'accouplement et des cris lancés le matin et le soir, également par la présence de sperme dans les excréments.

Alors que, la femelle manifeste sa maturité sexuelle en pondant des oeufs, avec un nombre qui peut aller de 180 à 300 œufs par an (Moula *et al.*, 2014).

La reproduction de la caille japonaise est contrôlée par la photopériode. Les testicules des mâles restent actifs, produisant des spermatozoïdes et sécrétant des concentrations élevées de testostérone qui activent les comportements copulatoires masculins. Les femelles conservent également un axe gonadique hypothalamus-hypophysaire pleinement actif (Robinson et Follett, 1982). Si le temps de la lumière du jour diminue moins de 12 h, la caille peut réduire ou cesser la ponte (Husset *et al.*, 2008 ; Blesbois et Brillard, 2009).

Les cailles japonaises sauvages ont une reproduction saisonnière et s'accouplent entre les mois de mai et octobre de chaque année. Alors que les cailles domestiques s'accouplent durant toute l'année (Chang *et al.*, 2009).

1-7 Alimentation des cailles

L'alimentation joue un rôle important dans la croissance de la caille. La nutrition a trois buts : maintenir la vie, assurer une bonne croissance et permettre la production maximale d'œufs pour les cailles d'élevage. L'aliment consommé par la caille japonaise est constituée principalement de céréales comme le maïs, le sorgho ou le mil qui doit satisfaire leurs besoins en contenant les classes de nutriments essentiels (eau, protéines, carbohydrates, lipides, minéraux, et vitamines) (Shanaway, 1994 ; Randall et Bolla, 2008).

Les cailles japonaises adultes mangent environ 14 à 18 g d'aliments par jour. La nourriture doit toujours être fraîche. Pour cela, la stocker dans un conteneur bien fermé dans un local sec et froid, protégé des rongeurs, acariens et autres animaux nuisibles. (Mondry, 2016).

Dès que le cailleteau d'un jour est introduit dans le bâtiment, on distribuera le premier jour une petite quantité finement broyé. Dès le deuxième jour, on donnera un aliment caille démarrage, on peut utiliser l'aliment du poulet de chair, finement broyé pour éviter le gaspillage par difficulté de préhension (Gavard, 2000).

La caille pondeuse a besoin d'un apport alimentaire de 24 % de protéines et de 3% de calcium. Quand il fait très chaud, les cailles mangent moins, il est préconisé alors d'augmenter cet apport à 3,5 % de calcium, quantité nécessaire pour pondre (Mondry, 2016).

1-8 Description des œufs de la caille japonaise

Les œufs de la caille sont de forme ovoïde, tachetés (Mizutani, 2003).

Ces taches varient d'une femelle a une autre et est caractéristique de chaque pondeuse (Lucotte, 1975).

L'œuf est de petite taille, mesure environ 30 mm et pèse 10g (Finsworth *et al.*, 2010). Ces derniers sont très riches en vitamines, minéraux et antioxydants. Malgré leur petite taille, leur valeur nutritive est trois à quatre fois plus riche que les œufs de poulet (Troutman, 2012).

L'enrichissement de l'alimentation des cailles en graines de line et de caroténoïdes, nous donne des œufs qui sont riches en oméga-3 et une augmentation de la concentration de la vitamine A dans le jaune d'œuf (Nau *et al.*, 2010).



Figure 3 : Les œufs de caille sont cinq fois plus petits que celui d'une poule
(Vanessa Cardoso, 2018).

Partie 2 : *Gallus gallus domesticus*

2-1 Présentation de l'espèce *Gallus gallus domesticus*

Les gallinacés sont des oiseaux dont l'espèce *Gallus gallus* est la mieux connue à cause de :

- Son importance dans l'alimentation humaine et son importance économique actuelle (FAO, 2004)
- Son utilisation dans les cultures humaines (Guèy, 2003).

L'utilisation de la poule domestique comme modèle de recherche animale n'est pas nouvelle. Depuis, elle est l'animal de choix des experts en biologie du développement et en génétique du développement. Une grande partie des connaissances sur le développement humain est basée sur des données obtenues à partir d'embryons de poule (Gopinath and Michelakis, 2007)

2-2 : Origine de l'espèce *Gallus gallus domesticus*

D'après Coquerelle (2000), cité par Fotsa (2008), il y a plus d'un million d'années, le genre *Gallus* formait probablement une seule population qui occupait le continent eurasiatique mais les périodes de glaciation ont divisé ce genre en trois groupes : le groupe méditerranéen ou moyen-oriental, le groupe Indien et celui de l'Asie de l'Est. Quatre espèces sont actuellement reconnues:

- *Gallus varius* : caractérisée par son pelage verdâtre, elle se localise le long de la côte de Java.

Chapitre I Etude bibliographique

- *Gallus sonnerati* : elle présente un plumage gris argenté sur une partie du corps et des plumes cornées au camail. Elle est ré pondue dans les forêts du sud-ouest du Continent Indien.
- *Gallus lafayetti* : Elle présente un plumage brun clair orangé au niveau de la poitrine avec une tache violette en haut du cou et une tache jaune sur la crête. Elle est rencontrée dans la zone boisée en Ceylan.
- *G. gallus* ou *G.bankiva* (coq rouge de jungle) : c'est l'espèce la plus ré pondue actuellement.

La plus part des auteurs et parmi eux DARWIN présentent que *Gallus gallus* (*G.bankiva*) serait l'ancêtre du poulet domestique, leur croisement est nommé *Gallus gallus domesticus* (Linnaeus 1758 ; Diop.1982).

Des données récentes en génétique moléculaire soutiennent l'hypothèse de l'origine polyphylétique du poulet domestique, impliquant trois sous-espèces : *Gallus gallus gallus*, *Gallus gallus jabouillei* et *Gallus spadiceus* (Fotsa, 2008).

En conclusion, les poulets présents en Afrique ont des origines indiennes, favorisées par les échanges commerciaux entre l'Inde et l'Afrique de l'Est (Fotsa, 2008).

2-3 Classification phylogénétique de *Gallus gallus domesticus*

La poule domestique (*Gallus gallus domesticus*) est un oiseau qui appartient à l'ordre des "galliformes", à la famille des "phasianidés", au genre "Gallus" et a sous-espèce "*Gallus gallus domesticus*". A cause des caractéristiques spécifiques des femelles ou des mâles, l'espèce est souvent définie par le nom coq ou poule mais dans la plupart des cas, le nom poule désigne les deux sexes (Singhapol, 2003).

2-4 Domestication de *Gallus gallus domesticus*

La domestication des animaux a été définie par Price (1999) comme le processus par lequel une population animale devient adaptée à l'homme est à un environnement de captivité par des changements génétiques intervenant au cours des générations et des étapes de développement renouvelées à chaque génération. Le poulet fut le dernier à être domestiqué, il y a 4500 ans environ (Andres, 2001). Selon Payne (1990), le centre de domestication du poulet actuel est inconnu à cause du large habitat de l'espèce sauvage. D'autres auteurs estiment que les premières

Chapitre I Etude bibliographique

domestications ont eu lieu en Asie du sud-est à cause de la forte présence de l'ancêtre sauvage. Il existe plusieurs centres de domestication à cause de la large distribution géographique que connaît l'espèce sauvage. Elle s'étend depuis L'inde, au sud-est de l'Asie, jusqu'en Indus au Pakistan, car cette espèce était présente dans la culture des harappéens et de Mohenj-Doro. Les données archéologiques récentes indiquent qu'il y a avait des poulets domestiques dans la Chine ancienne précisément dans la province de Hebei, 4000 ans avant Jésus Christ de même qu'en Egypte et en Grèce (Crawford, 1984),



Figure 4 : Les poules (Mathieu Vidard, 2020)

2-5 Habitat naturel

Un large habitat naturel est attribué à *G.gallus*. Il s'étend depuis les contreforts de l'Himalaya jusque dans les îles de la Sonde (Carford, 1990). Les sous espèces sauvages du coq doré sont actuellement présentes au Pakistan, en Hainan (île au sud de la chaîne), en Inde, en Asie du sud-est (Indochine), en Bruma (pays situé au sud-est de l'Asie) et dans les îles de Sumatra, de java et de Bali (Crawfors, 1990).

2-6 Alimentation

L'espèce *G. gallus* est une volaille omnivore, son alimentation se composant des petits caryopses de poacées, d'invertébrés, de quelques feuilles d'herbacées et petits cailloux qui servent au broyage des aliments (Maout, 1853). Dans le milieu villageois, en plus de son alimentation naturelle, le poulet se nourrit des débris d'alimentations, de cadavres d'animaux et des graines de céréales : maïs, riz, sorgho et mil (Guarana *et al.*, 1994).

2-7 Morphologie

Le poulet domestique est adapté à la vie terrestre comme tous les gallinacés, il se caractérise par un corps trapu, un sternum très développé, des membres abdominaux solidement musclés et des ailes courtes et arrondies. La tête est ornementée par la crête, les barbillons, les oreillons et souvent par une huppe de plumes colorées. Le bec est court et épais, souvent un peu recourbé. Le corps est recouvert de plumes et les pattes d'écaillés ; celles-ci se terminent par quatre doigts dont trois sont en avant et un vers l'arrière. Au niveau du tarse se trouve l'éperon ou l'ergot qui est bien développé chez le coq adulte. Le dimorphisme sexuel est bien marqué, le coq est généralement plus volumineux que la poule et se distingue par sa crête et ses barbillons plus développés et de couleur rouge (Diop, 1982).

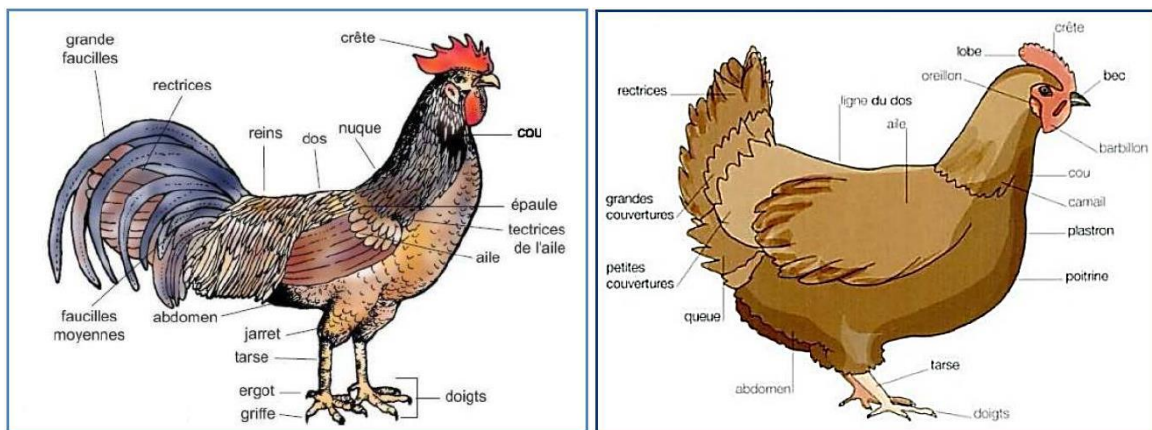


Figure 5 : Morphologie de coq (à gauche) et de poule (à droite) (Fettah, 2008 et Fournier, 2005).

Partie 3 : la perdrix choukar *Alectoris chukar*

3-1 Généralités sur une espèce apparentée : la perdrix choukar *Alectoris chukar*

La perdrix choukar *Alectoris chukar* appartient à la famille des Phasianidae, à l'instar de la perdrix gabra. C'est une espèce cynégétique qui peut localement être menacée par la chasse, mais aussi par l'agriculture intensive ou par le saturnisme aviaire (il regroupe toutes les variantes d'intoxications par le plomb aiguë ou chronique d'oiseaux, qu'ils soient sauvages, domestiques ou de compagnie) (Gill et Donsker, 2015).

Chapitre I Etude bibliographique



Figure 6 : *Alectoris chukar* (Gill et Donsker, 2018).

Cette espèce était auparavant considérée comme conspécifique avec la perdrix bartavelle *Alectoris greaca* mais elle est maintenant considérée comme une espèce distincte (**Barbanera et al., 2011**).

L'espèce d'*Alectoris chukar* a été introduite en Algérie depuis près de 50 ans, dont elle est élevée et contrôlée au niveau des centres Cynégétiques de Zéralda et de Tlemcen (**Idouhar et al., 2012**).

La perdrix choukar est une espèce eurasiatique, originaire des régions montagneuses d'Asie, de l'ouest Europe et moyen orient. Sa gamme naturelle comprend la Turquie, les îles méditerranéennes, l'Iran et l'est à travers la Russie et la Chine et au sud dans le Pakistan et Népal (**Erdoğan et al., 2012**). Elle est originaire et répondue dans l'Himalaya occidentale de l'Inde ou elle est trouvée à une altitude de 5000m (**Birds and Briding in India (BBI), 2009**).

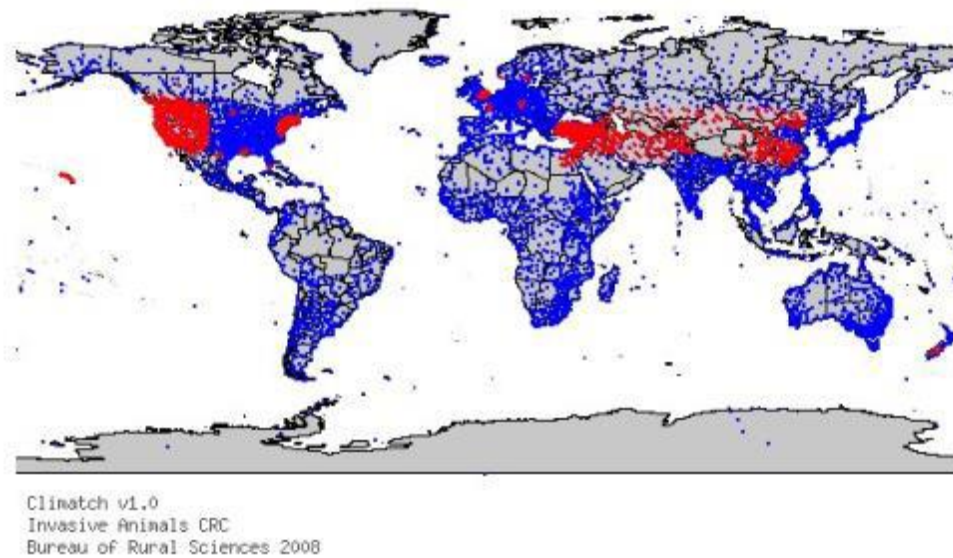


Figure 7. Distribution globale de la perdrix choukar *Alectoris chukar* (PRA, 2011).

3-2 Caractéristiques morphologiques et plumage

Alectoris Chukar est une perdrix de taille moyenne, elle possède un corps dodu et par bien des égards, notamment sa taille et son allure générale (BBI, 2009). Les Choukars mâles et femelles ont la même coloration : de la nuque jusqu'au bas du dos ils sont d'une teinte gris brun à gris clair. Une ligne noire foncée sur le front, les yeux et le bas du cou contraste la gorge blanche de la tête et de la poitrine grise, le ventre est chamois et les flancs sont bien barrés de noir et de châtaignier blanc, les plumes externes de la queue sont châtaines, les becs, les marges des paupières, des pattes et des pieds sont du rose corail au rouge foncé ou cramoisi (Gongallud et Villate, 2000).



Figure 8. Morphologie externe d'un perdreau juvénile (Kheniche et Sid Idris, 2020)



Figure 9. Morphologie externe de la perdrix choukar adulte (Kheniche et Sid Idris, 2020)

3-3 Reproduction

La perdrix choukar est généralement monogame. La formation des couples s'effectue dès la mi-Janvier dans les terres basses, vers la fin du mois de Mars dans les régions montagneuses, en Avril-Mai dans les régions méditerranéennes et du mois d'Avril au mois de Juillet en Asie méridionale, selon l'altitude. Les perdrix choukar creusent au sol une cuvette peu profonde qu'ils garnissent d'herbes sèches. La femelle y pond huit à seize oeufs dont l'éclosion se produit après 22 à 25 jours. La perdrix choukar est très robuste et résistante et entreprend généralement une couvée de substitution dans le cas où la première échoue, voire même une seconde couvée à la suite de la première, ce qui est assez rare chez le genre *Alectoris* (Madge et McGowan, 2002).

Chapitre II



II-1 Cytogénétique

La cytogénétique constitue l'ensemble des techniques cytologiques et moléculaires qui permettent l'étude des propriétés structurales et fonctionnelles des chromosomes durant les phases de division du cycle cellulaire (**Hare et Singh, 1979**).

La cytogénétique est l'étude des phénomènes génétiques au niveau de la cellule, plus précisément au niveau des chromosomes métaphasiques. Elle permet d'établir un caryotype sans la nécessité d'extraire l'ADN (**Rotureau, 2012 ; Julio et al., 2004; Goudjil-Benhizia, 2014**).

La cytogénétique classique participe d'une manière importante aux analyses de taxonomie et de phylogénie en apportant des précisions et des réponses à des problèmes d'ordre systématique et évolutif (**Yunis et al., 1982; Saada, 2009; Ouchia-Benissad et Ladjali-Mohammedi, 2018; Kartout-Benmessaoud et Ladjali-Mohammedi, 2018 ; Mahiddine-Aoudjit et Ladjali-Mohammedi, 2019**).

La détection de certaines anomalies complexes reste inaccessible aux techniques cytogénétiques classiques basées sur les marquages chromosomiques seules. En effet, certains remaniements sont identifiés par les techniques de cytogénétique moléculaire, en particulier l'Hybridation *In Situ* en Fluorescence (FISH). Il est alors non seulement possible d'identifier des gènes, mais aussi de les associer à des régions chromosomiques. Ainsi, la localisation de gènes importants par leur fonction biologique, a permis de construire les cartes physiques chromosomiques de l'homme et des animaux domestiques (**Hayes, 1993 ; De Sario Albertina et al., 1995; Ladjali- Mohammedi et al., 2001**).

L'intérêt majeur de la cytogénétique ne se limite pas uniquement à la description des chromosomes d'une espèce ou à la détection d'anomalies chromosomiques. Elle permet également de déceler les remaniements intra- et inter-chromosomiques ayant eu lieu durant l'évolution et permet ainsi de replacer différents taxons dans leur contexte phylogénétique (**Ouchia-Benissad, 2019**).

Des études plus récentes ont pu classer la cytogénétique en deux catégories (conventionnelle et moléculaire) (**Dutta, 2016 ; Balajee et hande, 2018**).

II.1.1 Cytogénétique classique ou conventionnelle

Le caryotype est une technique qui permet l'étude des chromosomes d'un individu. Cette technique permet d'obtenir une image, en microscopie optique, des chromosomes d'une cellule au cours de la métaphase ou de la prométaphase de la mitose. En génétique médicale, le caryotype contribue à la mise en évidence de remaniements chromosomiques équilibrés ou déséquilibrés (**Cédric Le Caignec, 2010-2011**).

Le Giemsa est un colorant ayant une forte affinité pour l'ADN. Il permet l'observation des chromosomes. Cela permet de classer les chromosomes par taille et de regarder l'indice centromérique (**Popescu et al., 1998**).

II.1.2 Cytogénétique moléculaire

Les techniques de la cytogénétique moléculaire reposent sur le principe de l'hybridation de la molécule d'ADN avec une séquence complémentaire variable, en fonction de la technique utilisée et la pathologie étudiée (**Marina Lafage-Pochitaloff, INSERM U, 1995**).

Les principales méthodes de cette discipline sont :

II.1.2.1 Hybridation *in situ* en fluorescence (FISH)

L'hybridation *in situ* en fluorescente repose sur la propriété d'hybridation, après dénaturation d'une sonde nucléotidique de synthèse, le plus souvent préalablement marquée chimiquement de façon à pouvoir être repérée par la suite, sur une séquence spécifique d'ADN génomique à étudier, cela aussi bien sur plaque métaphasique que sur noyau interphasique (**Figure 10**) (**Marina Lafage-Pochitaloff, 1995**).

Différentes techniques de biologie moléculaire ont permis de fabriquer des sondes spécifiques de différentes régions chromosomiques (sondes centromérique, subtélomériques ou recouvrant tout le chromosome) (**Figure 11**) (**Speicher MR, Gwyn Ballard S, Ward DC, 1996**).

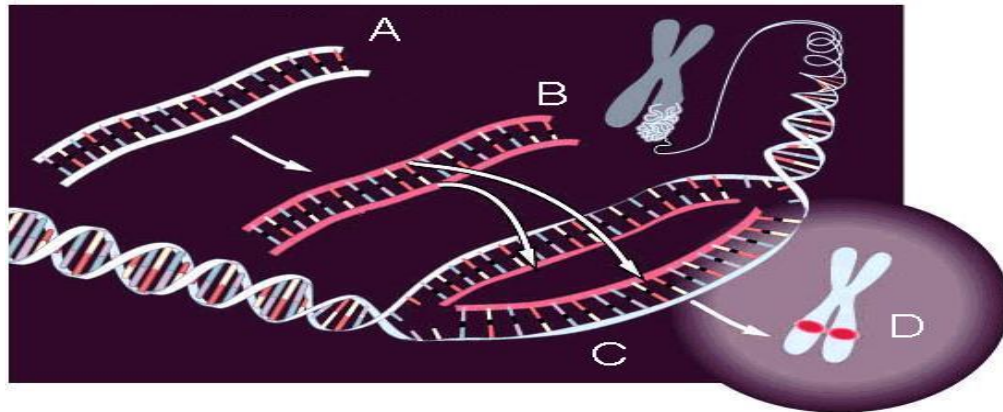


Figure 10 : Technique de l'hybridation *in situ* en fluorescente. (A) : sonde. (B) : sonde colorée à l'aide d'un fluorochrome. (C) : hybridation avec l'ADN nucléaire. (D) : apparence du chromosome métaphasique où la sonde s'est fixée (Ried, 2007).

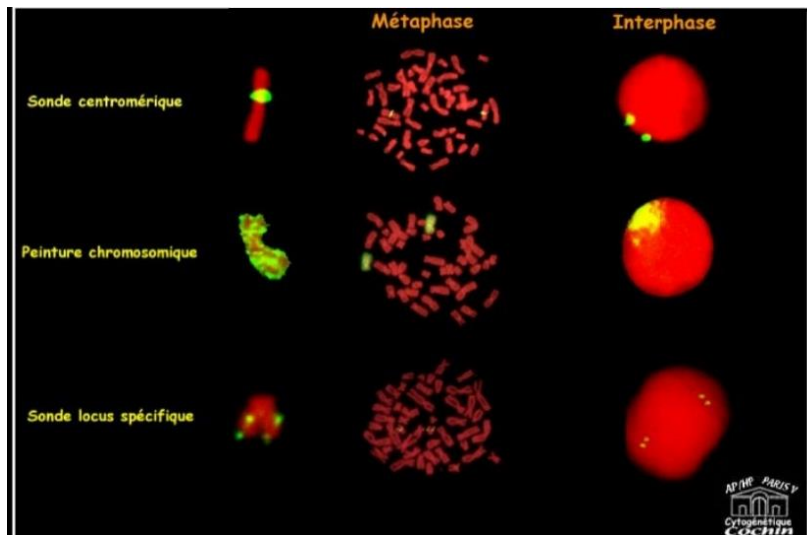


Figure 11 : Différents types de sondes utilisées en hybridation *in situ* (Rabineau et Dupont, 2008).

II.1.2.2 Puce à ADN

Des fragments d'ADN de séquence connue sont fixés de façon ordonnée sur un support inerte de quelques centimètres carrés puis hybridés avec l'ADN à étudier qui a été préalablement marqué par un fluorochrome (Siffroi et Chantot-Bastarud, 2004).

II.1.2.3 Hybridation génomique comparative (CGH)

Son principe consiste à Co-hybridiser en compétition une même quantité d'ADN d'un patient marqué par un fluorochrome (par exemple la fluorescéine émettant dans le vert) et d'un témoin

contrôle, marqué par un autre fluorochrome (par exemple la rhodamine émettant le rouge) sur une cible (Sanlaville *et al.*, 2005).

L'hybridation en chaque point des chromosomes sera proportionnelle à la concentration de l'ADN test et de l'ADN témoin de cette région (Figure 12) (Bernheim *et al.*, 2004).

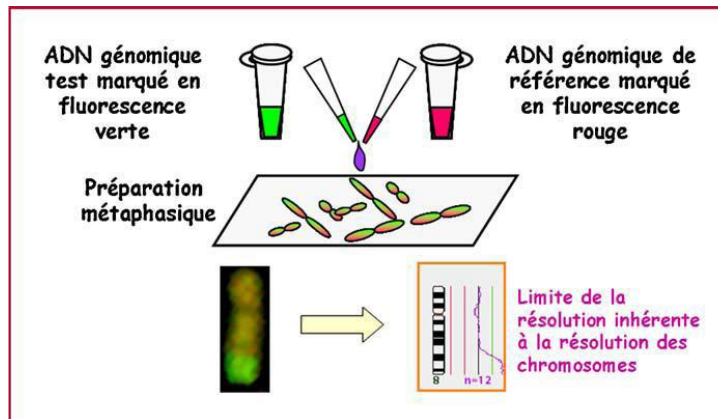


Figure 12 : Principe de l'Hybridation génomique comparative classique (Vialard et Molina Gomes, 2011).

II-2 Nomenclature et classification des chromosomes métaphasiques

Les chromosomes sont le support du matériel génétique, support de l'hérédité et de l'organisation de la vie cellulaire. Ils sont constitués d'ADN associé à des protéines formant la chromatine et sont localisés dans le noyau des cellules eucaryotes (Anthony *et al.*, 2002).

II.2.1 Structure du chromosome métaphasique

Les chromosomes métaphasiques sont constitués de deux chromatides sœurs réunies par un centromère dont la position définit les deux bras du chromosome le bras court (noté p) et le bras long (noté q) (Anthony *et al.*, 2002).

Plusieurs critères vont permettre de reconnaître et de classer les chromosomes (Figure 13) :

- **La taille** : Par convention, les chromosomes sont classés du plus grand au plus petit.
- **L'indice centromérique (IC)** : c'est-à-dire le rapport entre la taille du bras court et la taille totale du chromosome ($p/p+q$). Cet index permet de reconnaître trois familles de chromosomes :

Les chromosomes métacentriques dont les deux bras ont une taille à peu près équivalente ($IC= 1/2$), les chromosomes submétacentriques qui ont un bras franchement

plus petit que le bras long ($0 < IC < (1/2)$) et les chromosomes acrocentriques dont le bras court est quasi inexistant ($IC \approx 0$) (Cédric Le Caignec, 2010)

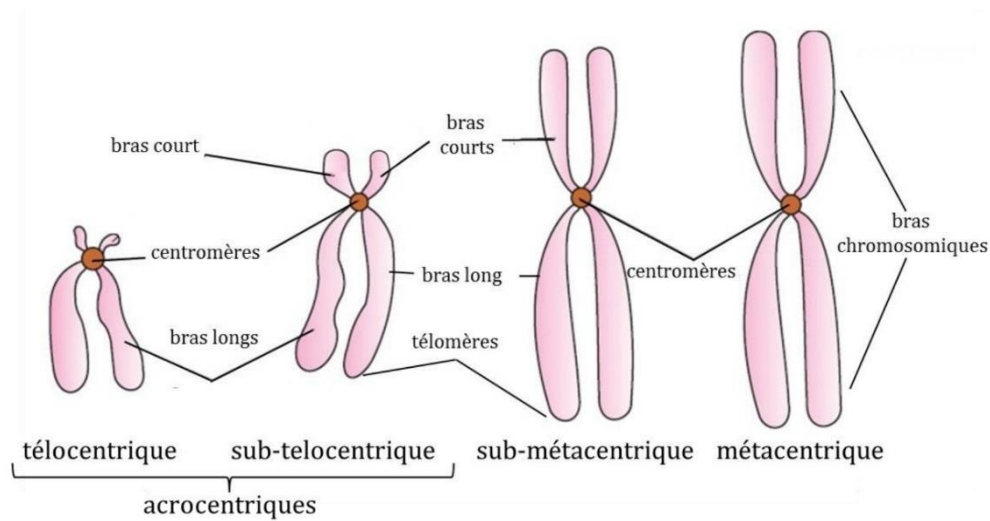


Figure 13 : Classification des différents types de chromosomes en fonction de la position relative de leur centromère (adapté selon Levan *et al.*, 1964).

II-3 Mutations génétiques

Le génome subit constamment des modifications qui peuvent être d'origine exogène (agressions de l'environnement) ou bien endogène (dysfonctionnement cellulaires). Ces mutations sont le plus souvent réparées par les mécanismes de réparation de la cellule, mais dans certains cas, elles peuvent échapper à ce processus. Les mutations chromosomiques affectent des segments d'ADN de plusieurs nucléotides jusqu'à des chromosomes entiers. Les modifications du nombre de chromosomes sont représentées par la polyploïdie (duplication de tout le génome) et la polysomie ou aneuploïdie (concerne seulement un ou plusieurs chromosomes). Les modifications de structure des chromosomes sont regroupées sous les termes de réarrangements ou remaniements chromosomiques (Rossignol *et al.*, 2004).

On appelle une anomalie chromosomique tout remaniement de nombre ou de structure des chromosomes (Harry, 2001 ; Eberhard, 2005).

Les anomalies chromosomiques de nombre entraîneront un caryotype toujours déséquilibré, contrairement aux anomalies de structure dont le caryotype pourra être équilibré ou déséquilibré (Atlas of Genetics, 2006 ; Allano et Clamens, 2000).

II-4 Anomalies chromosomiques

On appelle une anomalie chromosomique tout remaniement du nombre ou de structure des chromosomes (Harry, 2001 ; Eberhard, 2005).

II.4.1 Anomalies de nombre

Par définition, les anomalies de nombre affectent le nombre des chromosomes et non leur structure qui demeure normale. Les plus fréquentes sont les aneuploïdies c'est à dire la perte ou le gain d'un ou quelques chromosomes. Les polyploïdies désignent un nombre anormal de lots haploïdes entiers (Lafage-Pochitaloff, 2003).

II.4.2 Anomalies de structure

Les anomalies chromosomiques structurales sont moins fréquentes que les anomalies de nombre. Elles sont la conséquence des cassures chromosomiques suivies par un ou plusieurs recollements anormaux, le remaniement est intra-chromosomique s'il intéresse un seul chromosome ou interchromosomique lorsque deux chromosomes ou plus sont en cause. Elles peuvent être *équilibrées*, n'entraînant généralement pas d'effets phénotypiques ou *déséquilibrées* accompagnées souvent d'un phénotype anormal (Bourrouillou *et al.*, 1992 ; Lespinasse et Nadeau, 2005).

II.4.2.1 Anomalies de structure touchant un seul chromosome

- **Délétion**

Les délétions résultent d'une cassure chromosomique avec perte du segment distal (délétion terminale), ou de deux cassures sur un même bras chromosomique avec perte du segment intercalaire (délétion intercalaire ou interstitielle) (Figure 14A) (Morichon-Delvallez, 2006 ; Briard et Morichon-Delvallez, 2006).

- **Duplication**

Une duplication se définit comme la répétition (une ou deux fois) d'un segment de chromosome. Le segment dupliqué peut être dans la même orientation que le segment d'origine, c'est une duplication directe "*en tandem*", ou inversé par rapport au segment d'origine, c'est une duplication indirecte "*en miroir*" (Figure 14A) (Rives, 2006).

- **Chromosomes en anneau**

Les chromosomes en anneaux sont des chromosomes refermés sur eux-mêmes par leurs bras court et long. Ils résultent d'une double cassure aux extrémités d'un chromosome suivie par un recollement avec perte des segments distaux (Ravel et Siffroi, 2009).

- **Inversion**

Les inversions sont dues à deux cassures sur le même chromosome, suivies de recollement après inversion du segment intermédiaire. Elles sont dites péri-centriques si le fragment inversé inclut le centromère (Figure 14B) et para-centriques si les deux cassures se sont produites sur le même bras chromosomique (Figure 5C) (Briard et Morichon-Delvallez, 2006).

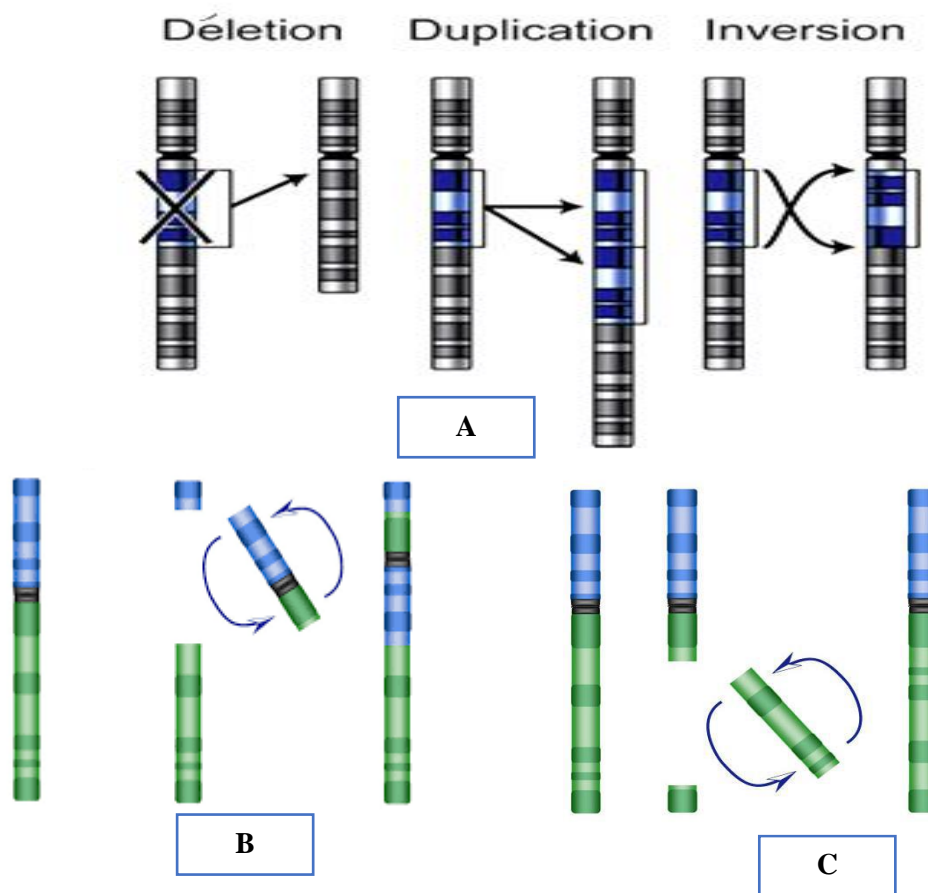


Figure 14 : Anomalies chromosomiques de structure apparaissant entre deux chromosomes (A) délétion, duplication, inversion. Inversion péricentrique (B) et paracentrique (C), qui seraient impliquées dans l'évolution du caryotype aviaire (D'après Van Harten, 2007 ; Mahiddine, 2020).

II.4.2.2 Anomalies de structure touchant deux chromosomes

- **Translocation**

C'est la transposition d'un fragment chromosomique sur un autre chromosome suite à une cassure chromosomique.

On distingue deux formes majeures de translocations, les translocations **récioproques** et les translocations **robertsoniennes** (Figure 15B) :

✓ Translocations robertsoniennes

Elles résultent de la fusion de deux chromosomes acrocentriques par fusion centrique, ou le plus souvent, par cassures dans les régions juxtacentromériques (Bernheim et al., 2004).

✓ Translocations récioproques

Ces translocations sont dues à des échanges de segments entre deux chromosomes non homologues, à la suite d'une cassure sur un bras de chaque chromosome, les fragments chromosomiques distaux aux points de cassure échangent leur position (Morichon-Delvallez, 2006).

• Insertion

Les insertions se traduisent par le transfert d'un segment intercalaire à l'intérieur d'un autre bras chromosomique. Secondaire à trois cassures, deux sur le chromosome donneur et une sur le chromosome receveur (Briard et Morichon-Delvallez, 2006).

• Fusion et fission

Ce type de réarrangement équilibré affecte des chromosomes entiers. En effet, la **fusion** est la réunion de deux chromosomes, avec la perte ou l'inactivation d'un des deux centromères (Figure 15C). Elle peut être centrique (translocation Roberstonienne) ou terminale. A l'inverse, la **fission** consiste en la division d'un chromosome en deux avec la création d'un centromère et des télomères (Figure 15D) (Rossignol et al., 2004).

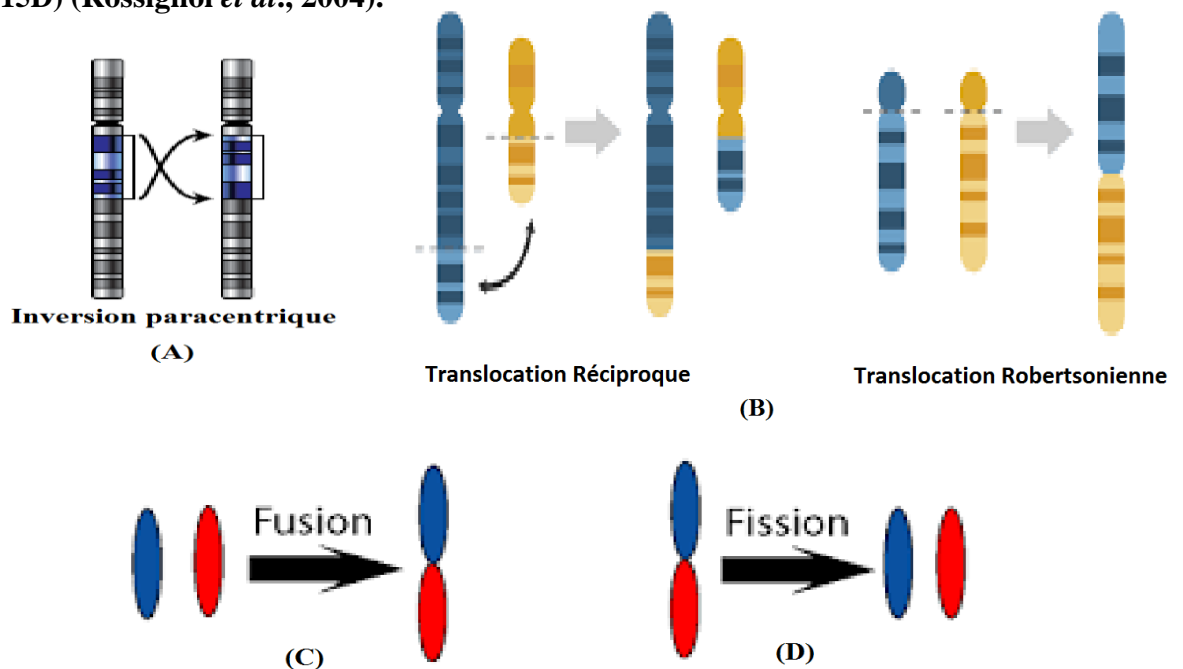


Figure 15 : Réarrangements chromosomiques équilibrés (A, B, C et D) (Harewood et Fraser, 2014).

II-5 Le génome aviaire

Il existe de nombreuses espèces d'oiseaux (plus de 10 500) et la quantité de chromosomes présente à l'intérieur de leur noyau diffère d'une espèce à l'autre. Les caryotypes aviaires ont un nombre diploïde comptant 40 à 138 chromosomes avec une moyenne de 76 à 82 pour la plupart des espèces (**Takagi et Sasaki, 1974 ; De Boer, 1976; De Boer et Sinoo, 1984; Christidis, 1990**).

Chez les oiseaux, la taille des chromosomes est très variable ce qui permet de les diviser en trois groupes distincts ; les microchromosomes, les macrochromosomes et les chromosomes intermédiaires (**Axelsson et al., 2005 ; Fillon, 1998**). L'organisation chromosomique des oiseaux est dichotomique, puisqu'elle est composée de 7 à 10 paires de macrochromosomes et de 30 à 33 paires de microchromosomes (**Christidis, 1990**).

Les oiseaux possèdent les plus petits génomes des amniotes, d'une taille estimée à environ 0,91 Gb chez le colibri à menton noir et à 1,3 Gb chez l'autruche. Cette compaction est souvent associée à une adaptation du métabolisme liée au vol (**Hughes et Hughes, 1995**).

La reconstruction des caryotypes ancestraux et la reconstitution des événements évolutifs permettent d'étudier l'organisation des génomes d'espèces existantes, mais aussi de définir, par extrapolation, les réarrangements chromosomiques chez les espèces déjà éteintes. Parmi toutes les espèces examinées, il semblerait que le caryotype du poulet ait une grande ressemblance avec celui de l'ancêtre commun aviaire (**Griffin, 2007**). Il a été accepté que le poulet et ses descendants galliformes ont subi le moins de réarrangements chromosomiques tout en divergeant de l'oiseau ancestral (**Romanov et al., 2014; Griffin et al., 2015; O'Connor et al., 2018**).

II-6 Macrochromosomes et Microchromosomes

Les caryotypes aviaires sont extrêmement hétérogènes et présentent généralement un faible nombre de chromosomes de grande taille appelés macrochromosomes, ainsi qu'un nombre important de chromosomes de très petite taille, appelés les microchromosomes d'une longueur moyenne de 12.4 Mb (**Figure 7**) (**Rodionov, 1996**),

Le contenu en ADN des macro- et des microchromosomes a été estimé à environ 800 et 400Mb, respectivement (**Rodionov, 1996 ; Smith et Burt, 1998**). La taille des macrochromosomes varie de 30 à 250 Mb, alors que pour les microchromosomes elle est en moyenne de 12 Mb. Le plus petit microchromosome mesure 3 Mb (**Pichugin et al., 2001**).

Chapitre II Cytogénétique et remaniements chromosomiques

Dans les macrochromosomes, le taux de recombinaison est d'un crossing-over par 30 Mb, environ le double de celui observé chez l'homme (**Rodionov et al., 1992a et 1992b**). Alors qu'il est d'un crossing-over par 12 Mb dans les microchromosomes, presque cinq fois plus que chez les mammifères (**Rodionov, 1992**).

Chez le poulet, les microchromosomes représentent **18 à 23%** de la taille du génome (**Smith et Burt, 1998**). Ils sont riches en bases GC (**Auer et al., 1987**). Ils sont 2 à 3 fois plus denses en gènes que les macrochromosomes (**Smith et al., 2000**).

Les microchromosomes sont également hyperacétylés et la plupart d'entre eux se répliquent précocement durant la phase S. Ces deux caractéristiques étant typiques des domaines chromosomiques riches en gènes (**Figure 16**) (**McQueen et al., 1998**).

II-7 Le poulet comme modèle aviaire

Le caryotype du poulet représente le caryotype typique des oiseaux avec un nombre diploïde de 78 chromosomes, (**Pollock et Fechheimer, 1976**). Le poulet *Gallus gallus domesticus* est le descendant domestique du poulet sauvage *Gallus gallus*

Le caryotype aviaire ancestral a été reconstitué à la suite de plusieurs analyses chromosomiques comparatives et l'utilisation de la peinture chromosomique (**Shetty et al., 1999; Guttenbach et al., 2003; Derjusheva et al., 2004 ; Romanov et al., 2014**)

Le génome de la Poule fait l'objet depuis plusieurs années d'une étude de cartographie génétique approfondie dans le but d'accéder à des gènes correspondant aux QTL d'intérêt zootechnique (**Tixier-Boichard et al., 1997**).

II-8 Chromosomes sexuels

Les chromosomes sexuels des oiseaux sont supposés provenir d'un couple d'autosomes ancestraux. Conformément à cette origine commune, il a été déduit que l'évolution des chromosomes sexuels aviaires aurait été amorcée avant l'apparition des oiseaux modernes (**Handley et al., 2004; Yazdi et Ellegren, 2014**).

Les chromosomes sexuels aviaires sont nommés Z et W où la femelle constitue le sexe hétérogamétique (ZW, équivalents aux XY des mammifères) (**Werner, 1927 ; Ladjali et al., 1995; Ladjali-Mohammedi et al., 1999**).

Chez les oiseaux, le chromosome Z se retrouve à la fois chez le mâle et chez la femelle. Il se retrouve en deux exemplaires dans le caryotype du mâle et en un seul exemplaire chez la

Chapitre II Cytogénétique et remaniements chromosomiques

femelle, il est plus grand que le chromosome W et est beaucoup plus riche en gènes (Ayers, 2013). Il détient toujours une taille à peu près similaire d'une espèce à l'autre et il représente environ de 7 à 10 % du génome total (Stiglec *et al.*, 2007).

Chez le mâle, les deux chromosomes Z sont fonctionnels ce qui est à l'origine du sexe dosage spécifique des gènes portés par ce chromosome (Graves, 2014).

Le chromosome Z est remarquablement conservé dans plusieurs taxons aviaires. Il a une longueur absolue stable chez le poulet *Gallus gallus*.

En revanche, le chromosome W est très variable et de larges segments de ce dernier ne sont pas partagés par la majorité des oiseaux (Grave et shetty, 2000).

Le chromosome W est de petite taille et détient beaucoup d'hétérochromatines. Il est estimé que le W représenterait environ seulement 1 % du génome haploïde complet des oiseaux (Gilgenkrantz, 2004).

Le rôle du chromosome W dans la féminisation des oiseaux est encore à ce jour mal compris. Certains gènes interviennent spécifiquement dans la différenciation sexuelle aviaire (Gilgenkrantz, 2004 ; Agate *et al.*, 2003).

De nombreuses études ont montré que les systèmes X/Y et Z/W auraient divergé indépendamment à partir de différents autosomes qui auraient acquis des déterminants sexuels au cours de l'évolution (Ohno, 1961 ; Graves et Shetty, 2001; Belott *et al.*, 2010).

Des analyses comparatives utilisant la peinture chromosomique et la cartographie des gènes ont montré divers degrés d'homologie entre le Z et W chez les Galliformes (Stiglec *et al.*, 2007).

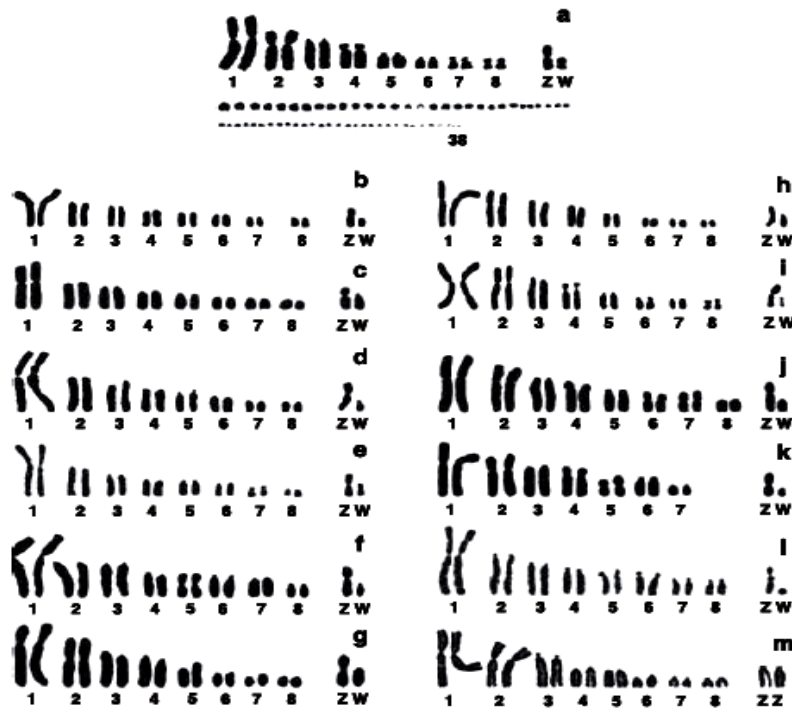


Figure 16 : Organisation typique en macro- / micro-chromosomes de certains caryotypes aviaires en coloration conventionnelle. (a) Poulet domestique *Gallus domesticus*, (b) Faisan leucomèle *Lophura nycthemera*, (c) Faisan de Lady Amherst *Chrysolophus amherstiae*, (d) Faisan de Colchide *Phasianus colchicus*, (e) Dindon sauvage *Meleagris gallopavo*, (f) Grand Tétras *Tetrao urogallus*, (g) Caille japonaise *Coturnix japonica*, (h) Caille peinte *Coturnix chinensis*, (i) Bambusicole de Chine *Bambusicola thoracica*, (j) Paon bleu *Pavo cristatus*, (k) Pintade de Numidie *Numida meleagris*, (l) Colin de Californie *Callipepla californica* et (m) Ortalide chacamel *Ortalis vetula* (Shibusawa *et al.*, 2004).

II-9 Caryotypes de quelques espèces apparentées

II.9.1 Caryotype du poulet domestique *Gallus gallus domesticus*

Le caryotype normal du poulet ($2n=78$) est constitué de 38 paires d'autosomes, morphologiquement différents, classés par ordre de taille décroissant et d'une paire de chromosomes sexuels Z et W (Figure 17). Les huit premières paires chromosomiques sont des macrochromosomes dont les 6 premières paires représentent approximativement 65% de la longueur totale du génome (Figure 18) (Fechheimer, 1971). Parmi les 8 paires de macrochromosomes, 3 paires sont submétacentriques (1, 2 et 8) ayant leur centromère situé à peu près dans la région médiane, 2 paires sont télocentriques (4 et 7) ayant leur centromère situé en région subtélomérique et 3 paires sont acrocentriques (3, 5 et 6) avec leur centromère en région terminale (Ladjali-Mohammedi *et al.*, 1999).

Chapitre II Cytogénétique et remaniements chromosomiques

Les deux chromosomes sexuels (Z et W) sont métacentriques. La morphologie des 30 paires de microchromosomes est beaucoup plus homogène, la plupart sont acrocentriques (Fotsa, 2008).

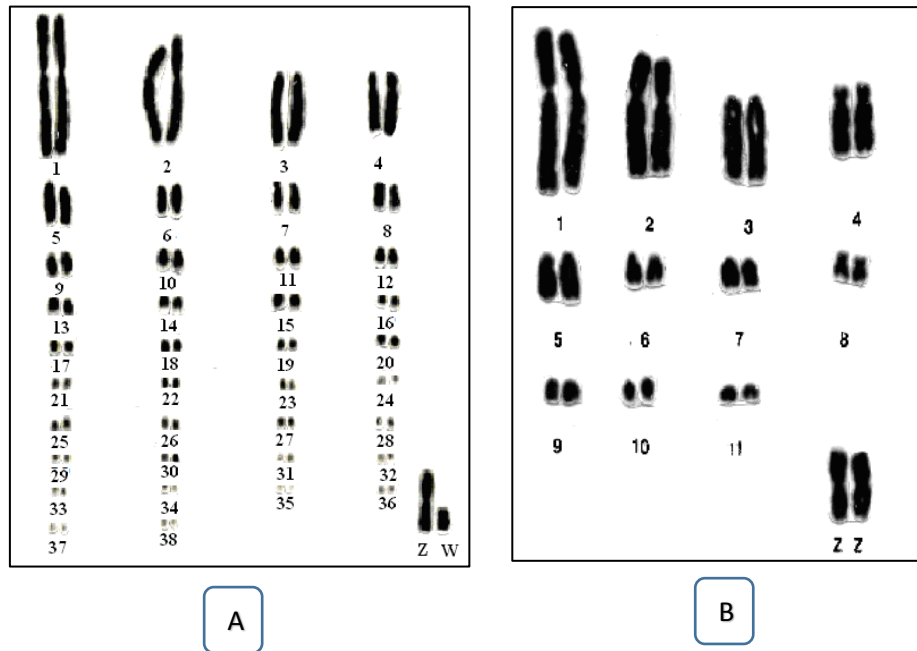


Figure 17 : Caryotype de la poule domestique *Gallus domesticus* en coloration conventionnelle (A) : Mâle, (B) : Femelle (Ladjali, 1994).

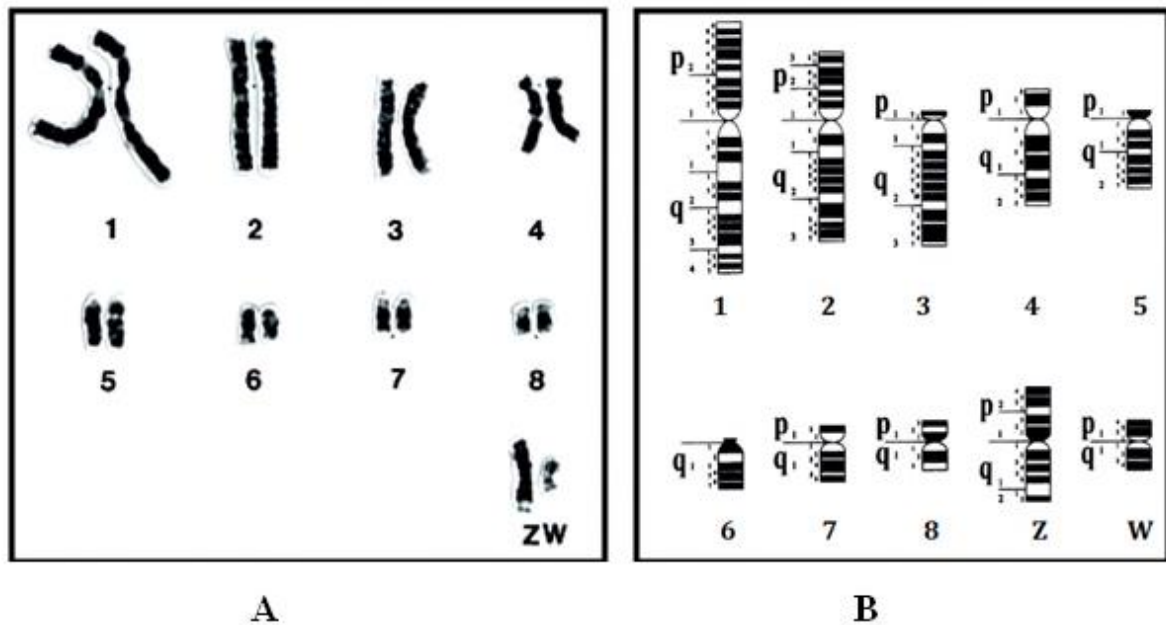


Figure 18 : (A) Caryotype en bandes GTG. (B) Idiogramme standard des 8 premières paires chromosomiques et les chromosomes Z et W de la poule domestique *Gallus gallus domesticus* (Ladjali-Mohammedi *et al.*, 1999).

II.9.2 Caryotype de la caille japonaise *Coturnix japonica*

Le caryotype de la caille japonaise est constitué de 78 chromosomes dont 6 paires de macrochromosomes et 33 paires de microchromosomes (Talluri *et al.*, 1965; Schmid *et al.*, 1989 ; Kartout-Benmessaoud *et al.*, 2018). Les macrochromosomes (1, 2 et le 8) sont submétacentriques, le (3, 5, 6, 7) sont acrocentriques, le 4 est subtélocentrique (Figures 19) (Stock et Bunch, 1982; Shibusawa *et al.*, 2004, Kartout-Benmessaoud *et al.*, 2018).

Le chromosome Z est métacentrique, alors que le chromosome W est acrocentrique (Turpin *et al.*, 1974 ; Kartout-Benmessaoud *et al.*, 2018). Concernant les microchromosomes, la plupart sont submétacentriques chez la caille japonaise (Figure 19) (Calderon et Pigozzi, 2006).

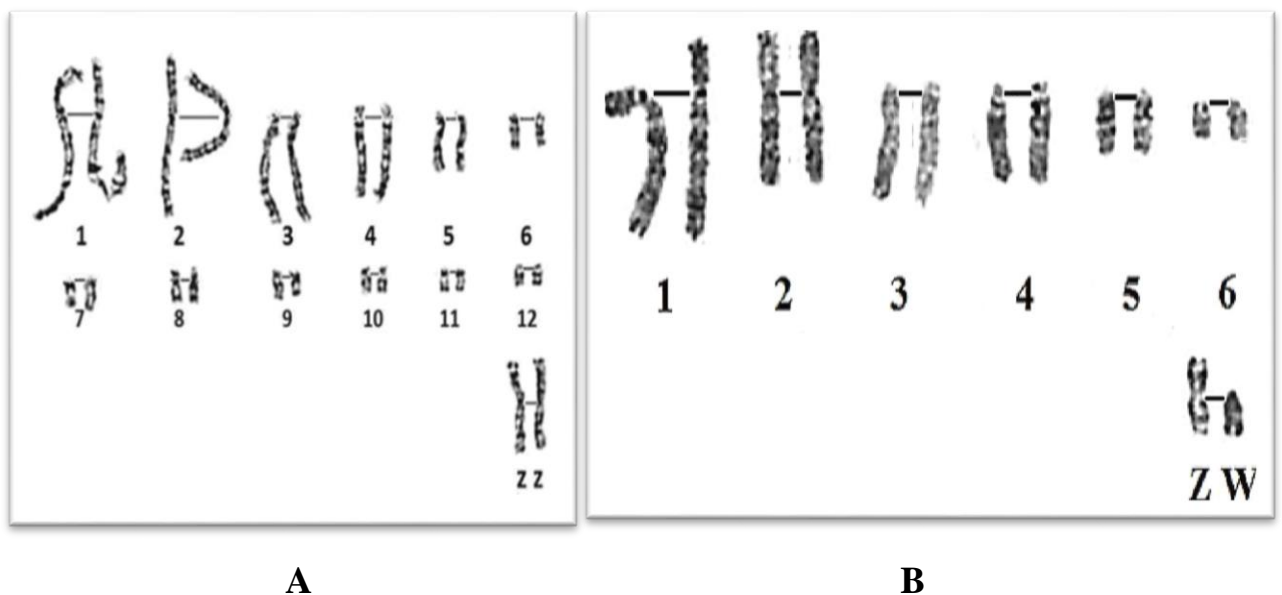


Figure 19 : Caryotype partiel en bandes GTG de la caille japonaise *Coturnix japonica* de sexe (A) mâle et (B) femelle (Kartout-Benmessaoud *et al.*, 2018).

II.9.3 Caryotype de la perdrix choukar *Alectoris chukar*

Le nombre diploïde de la perdrix choukar *Alectoris chukar* a été estimé à $2n=78$. Son caryotype montre 8 à 10 paires de macrochromosomes et 30 à 28 paires de microchromosomes. Le nombre de microchromosomes de perdrix est assez similaire à celle des Galliformes. Les microchromosomes ont été classés arbitrairement par taille décroissante. Les chromosomes 1 et 2 sont submétacentriques chez les perdrix Choukar ainsi que les chromosomes de 3 à 8 sont acrocentriques. Les chromosomes sexuels Z et W sont submétacentriques et morphologiquement conservés (Figure 20) (Ishishita *et al.*, 2014 ; Ouchia-Benissad et Ladjali-Mohammedi, 2018).

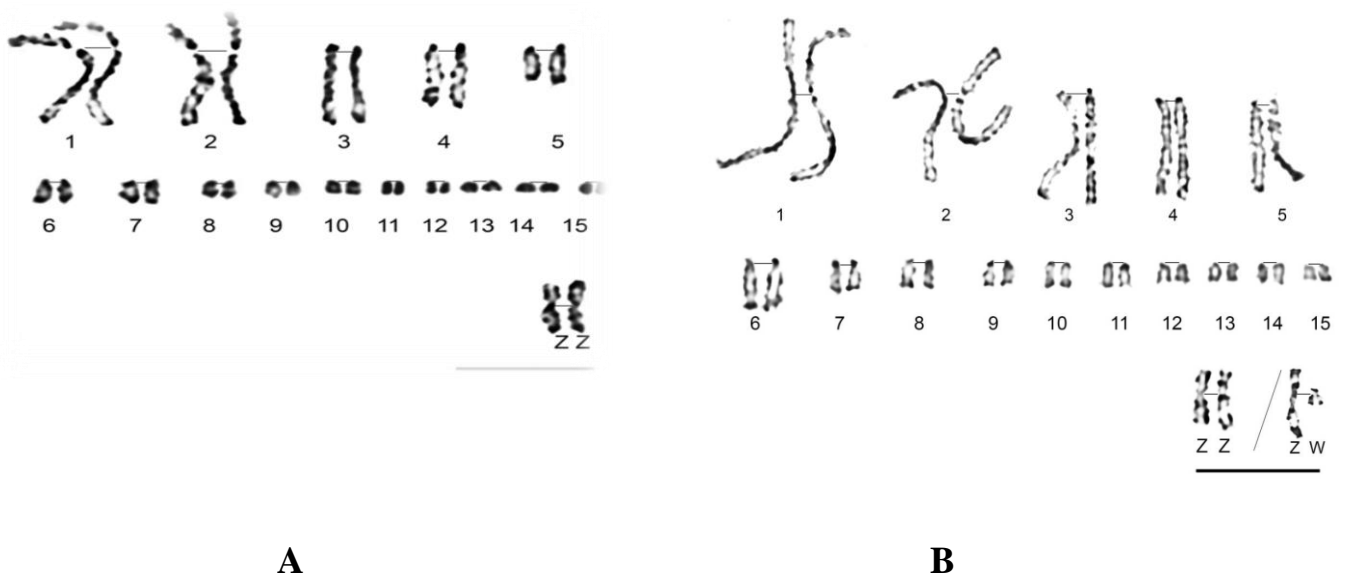


Figure 20 : Caryotype partiel de la perdrix choukar mâle en bandes (A) morphologiques GTG et (B) RHG (Ouchia-Benissad et Ladjali-Mohammed, 2018)

Chapitre III



III-1 Analyse bibliographique comparée des chromosomes du poulet domestique *Gallus gallus domesticus* avec ceux de la caille japonaise *Coturnix japonica* et la perdrix choukar *Alectoris chukar*

Environ 65% des caryotypes d'oiseaux présentent 76 à 82 chromosomes, dont 7 à 8 paires de macrochromosomes (Christidis, 1990 ; Rodionov, 1997). Le nombre diploïde des trois espèces conforte la notion de conservation des caryotypes, particulièrement dans l'ordre des Galliformes (Stock et Bunch 1982 ; Shibusawa *et al.*, 2002)

Le caryotype de la poule domestique représente le caryotype typique des oiseaux. Un premier caryotype standard en bandes G a été proposé (Carlenius *et al.*, 1981). Des résultats ont donné lieu à une standardisation des huit premières paires de macrochromosomes en plus des gonosomes Z et W et ont permis d'établir les caryotypes en bandes G et R ainsi que les idiogrammes correspondants (Tableau 2) (Ladjali-Mohammedi *et al.*, 1999).

La comparaison des motifs de bandes GTG-a permis de mettre en évidence des similitudes et quelques différences morphologiques entre la caille japonaise et le poulet domestique. De fortes homologies ont été observées sur la plupart des macrochromosomes (3, 5, 6, Z) (Figure 21).

Plusieurs études ont confirmé la présence de certains réarrangements chromosomiques détectés notamment sur les chromosomes 1, 2, 4, 7, 8 et W (Figure 21) (Sasaki *et al.*, 1981 ; Stock et Bunch, 1982; Shibusawa *et al.*, 2001; Zlotina *et al.*, 2012 ;Kartout-Benmessaoud, 2019).

Une grande homologie des motifs de bandes GTG ainsi que l'apparition d'un néocentromère ont été décelés sur les chromosomes 1 des deux espèces de Galliformes. Aussi, la présence d'une double inversion péricentrique qui aurait pu se produire au cours de l'évolution sur le chromosome 2 de la caille japonaise a été détectée (Kartout-Benmessaoud, 2019).

Une forte homologie des motifs des bandes G a été observée sur les chromosomes 4 chez les deux espèces. La présence d'un bras court (p) plus important a été constatée chez le poulet domestique par rapport à la caille japonaise ce qui a été expliqué par la formation d'un néocentromère (Kartout-Benmessaoud, 2019).

Le chromosome 7 de la caille japonaise est acrocentrique alors que celui du poulet est télocentrique. Cependant, une délétion du bras court p aurait pu avoir lieu chez de la caille

Chapitre III Analyse chromosomique comparative entre La Caille japonaise, le Poulet domestique et la Perdrix choukar

japonaise au cours de l'évolution. Les différences des motifs de bandes G ont été mises en évidence entre le poulet et la caille japonaise pourraient être le résultat d'une inversion péricentrique (**Kartout-Benmessaoud, 2019**).

Le chromosome 8 de la caille japonaise est acrocentrique et télocentrique chez le poulet domestique. Alors que des différences des motifs de bandes G ont été mises en évidence avec le poulet et pourraient être le résultat d'une inversion péricentrique (**Kartout-Benmessaoud, 2019**).

Le chromosome W de la caille japonaise est subtélocentrique alors que celui du poulet domestique est métacentrique. La différence morphologique observée dans cette étude pourrait être le résultat de la formation d'un néocentromère (ENC) sur le chromosome ancestral de la caille japonaise au cours de l'évolution (**Kartout-Benmessaoud et Ladjali-Mohammedi, 2018 ; Kartout-Benmessaoud, 2019**).

<p>GGA1 Cj1</p>	<p>GGA2 Cj2</p>
<p>Submétacentriques néocentromère</p>	<p>Submétacentriques double inversion péricentrique</p>
<p>GGA3 Cj3</p>	<p>GGA4 Cj4</p>
<p>Acrocentriques</p>	<p>Télocentriques Submétacentriques (néocentromère)</p>

Chapitre III Analyse chromosomique comparative entre La Caille japonaise, le Poulet domestique et la Perdrix choukar

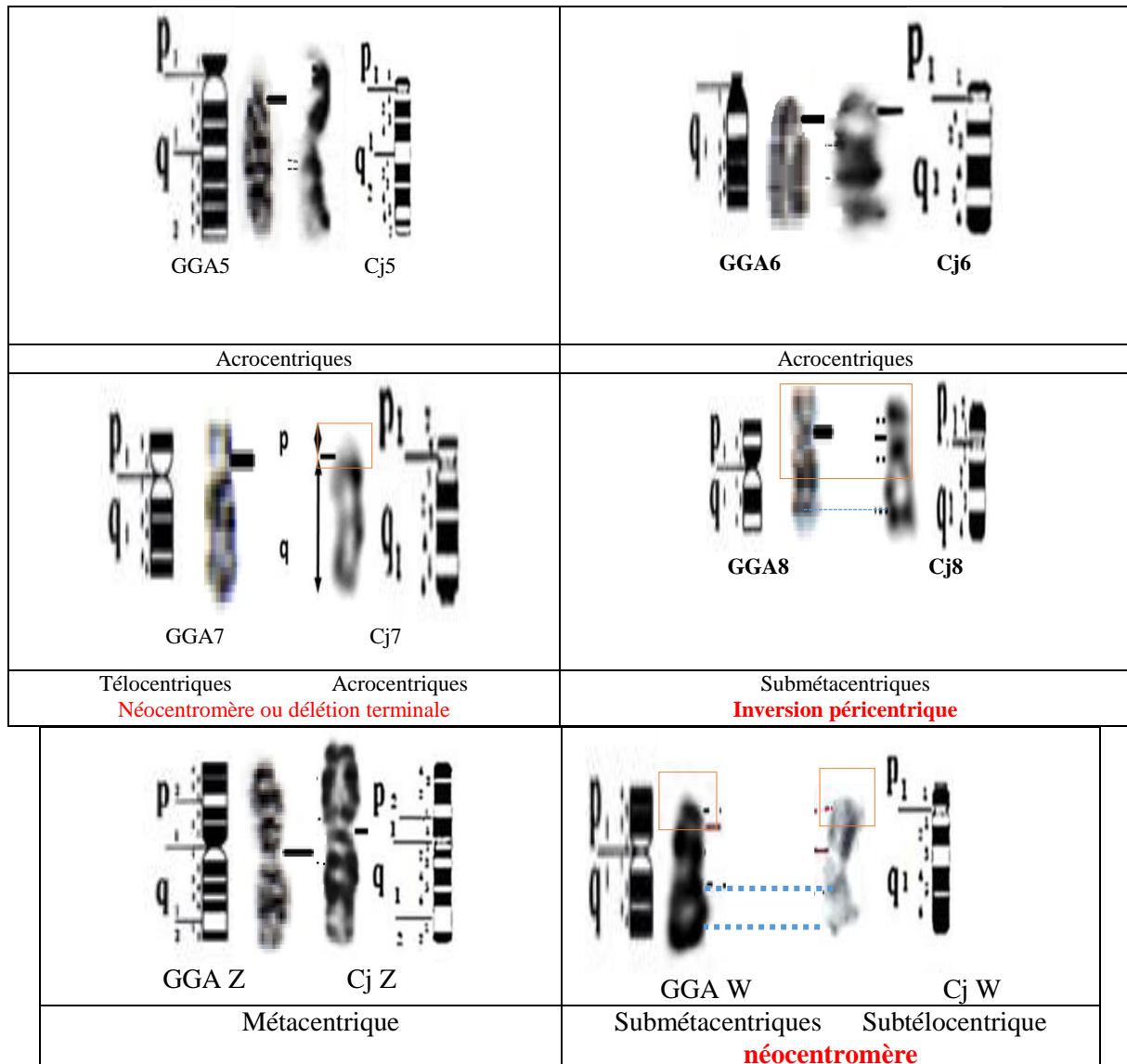


Figure 21 : Comparaison des huit premiers macrochromosomes ainsi que les deux gonosomes entre le poulet domestique *Gallus gallus domesticus* et la caille japonaise *Coturnix japonica* (Karkout-Benmessoud et Ladjali-Mohammed, 2018 ; Kartout-Benmessoud, 2019).

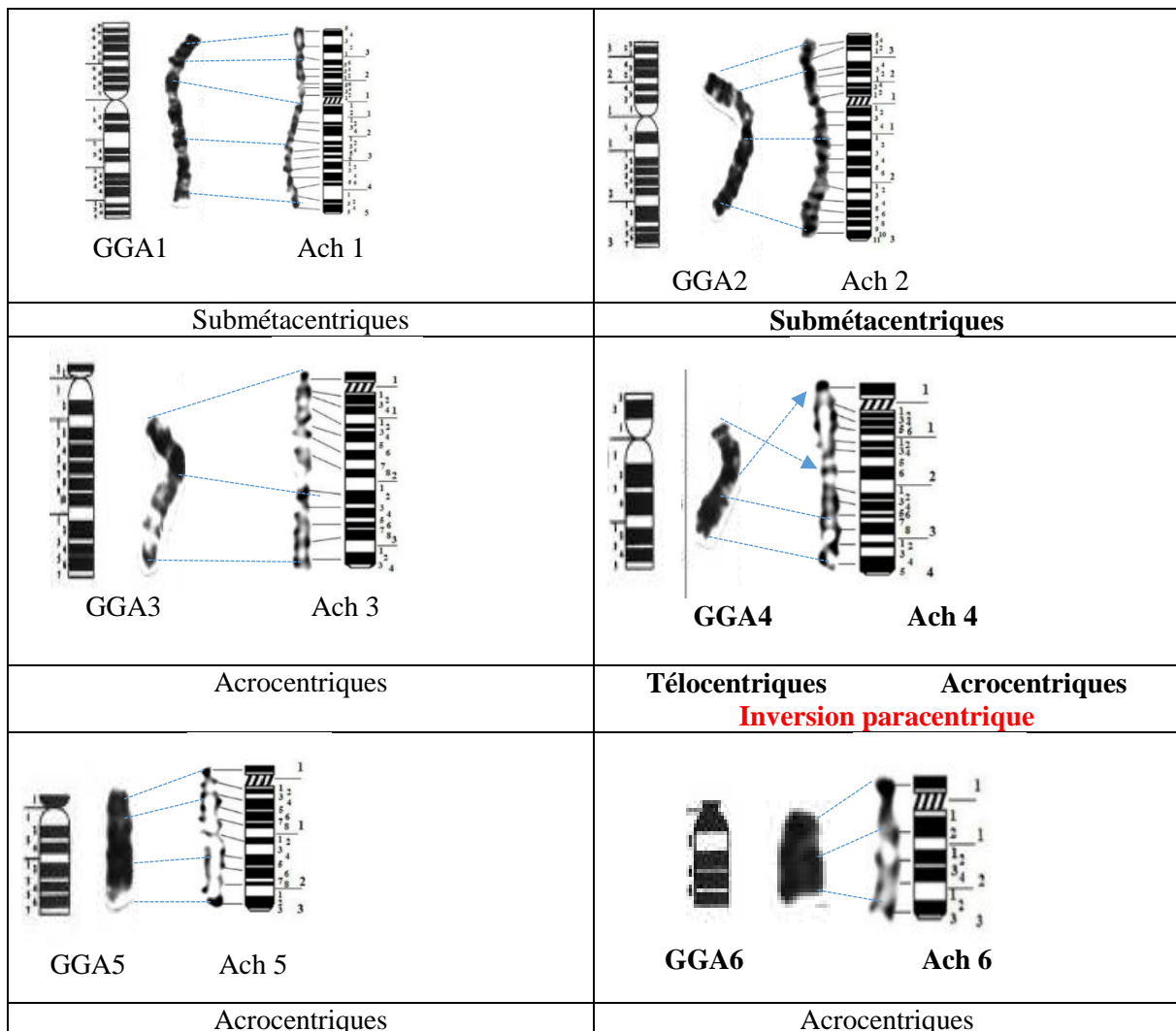
L'étude de Ouchia-Benissad (2019) a permis de décrire les huit premières paires autosomes ainsi que les gonosomes ZW de la perdrix choukar, Les analyses comparatives interspécifiques utilisant la peinture chromosomique via des sondes de microchromosomes de poulet a révélé une parfaite homologie avec les macrochromosomes de la perdrix choukar (Ouchia-Benissad et Ladjali- Mohammed, 2018 ; Ouchia-Benissad, 2019).

Chapitre III Analyse chromosomique comparative entre La Caille japonaise, le Poulet domestique et la Perdrix choukar

La comparaison de la morphologie et des motifs de bandes GTG et RBG a révélé des différences aux niveaux des chromosomes acrocentriques de la perdrix choukar 4, 7 et 8 (**figure 2**) (**Ouchia-Benissad et Ladjali-Mohammedi, 2018 ; Ouchia-Benissad, 2019**).

Le chromosome 4 est acrocentrique chez les perdrix et télocentrique chez le poulet. Tandis que chez la perdrix choukar, la région subcentromérique présente un profil différent évoquant une inversion paracentrique. Les chromosomes 7 et 8 sont acrocentriques chez la perdrix choukar et respectivement télocentriques et submétacentriques chez le poulet domestique.

La différence morphologique des chromosomes 7 et 8 entre la perdrix choukar et le poulet, malgré la conservation des profils de bandes, pourrait s'expliquer par le repositionnement du centromère ou des inversions paracentriques (**Ouchia-Benissad et Ladjali-Mohammedi, 2018 ; Ouchia-Benissad, 2019**).



Chapitre III Analyse chromosomique comparative entre La Caille japonaise, le Poulet domestique et la Perdrix choukar

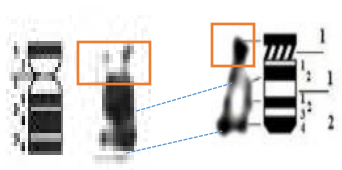
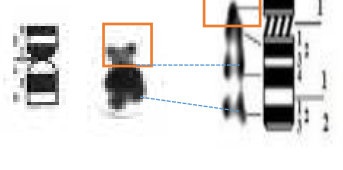
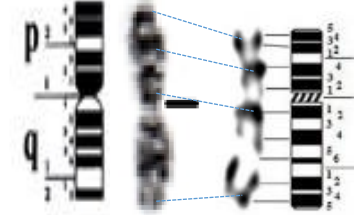
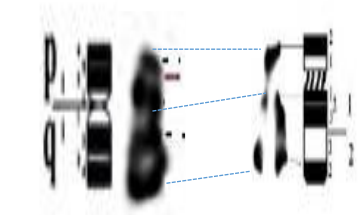
 <p>GGA7 Ach 7</p>	 <p>GGA8 Ach 8</p>
<p>Télocentriques Acrocentriques néocentromère ou inversion paracentrique</p>	<p>Submétacentriques acrocentriques néocentromère ou inversion paracentrique</p>
 <p>GGA Z Ach Z</p>	 <p>GGA W Ach W</p>
<p>Métacentriques submetacentriques</p>	<p>Submétacentriques</p>

Figure 22 : comparaison des huit premiers macrochromosomes ainsi que les deux gonosomes entre le poulet domestique *Gallus gallus domesticus* et la perdrix choukar *Alectoris chukar* (Ouchia-Benissad et Ladjali-Mohammed, 2018 Ouchia-Benissad, 2019).

Tableau 2 : Analyse comparative de la morphologie des macrochromosomes et des gonosomes ZW des trois espèces de galliformes et les éventuels réarrangements chromosomiques proposés (Kartout-Benmessaoud et Ladjali-Mohammed, 2018 ; Ouchia-Benissad, 2019).

Chapitre III Analyse chromosomique comparative entre La Caille japonaise, le Poulet domestique et la Perdrix choukar

Espèces	Caille japonaise	Perdrix choukar
Poulet domestique		
1 Submétacentrique	Submétacentrique Néocentromère	Submétacentrique
2 Submétacentrique	Submétacentrique double inversion péricentrique	Submétacentrique
3 Acrocentrique	Acrocentrique	Acrocentrique
4 Télocentrique	Subtélocentrique néocentromère	Acrocentrique Invr.paracentrique
5 Acrocentrique	Acrocentrique	Acrocentrique
6 Acrocentrique	Acrocentrique	Acrocentrique
7 Télocentrique	Acrocentrique Néocentromère ou délétion terminale	Acrocentrique
8 Submétacentrique	Submétacentrique l'inversion péricentrique	Acrocentrique Néocentromère Invr.paracentrique
Z Métacentrique	Métacentrique	Submétacentrique
W Submétacentrique	Subtélocentrique néocentromère	Submétacentrique

IV-2.1 Comparaison chromosomique entre la caille japonaise *Coturnix japonica* et la perdrix choukar *Alectoris choukar*

- **Comparaison morphométrique**

Les analyses comparatives des macrochromosomes de la perdrix choukar et la caille japonaise ont montré que les macrochromosomes de la perdrix choukar sont plus décondensés que leurs homologues de la caille japonaise (**Tableaux 3, 4**) (**Ouchia-**

Chapitre III Analyse chromosomique comparative entre La Caille japonaise, le Poulet domestique et la Perdrix choukar

Benissad et Ladjali-Mohammedi, 2018 ; Kartout-Benmessaoud et Ladjali-Mohammedi, 2018).

La taille des huit premiers macrochromosomes de la caille japonaise est comprise entre 4,1µm et 0,53 µm alors que chez la perdrix choukar elle est comprise entre 14 à 3 µm. Ces mesures montrent le succès de synchronisation et la résistance des cellules de la perdrix choukar aux différents traitements *in vitro* (BrdU, thymidine, ...) (**Kartout-Benmessaoud 2019 ; Ouchia-Benissad 2019**).

Tableau 3 : Morphométrie des chromosomes de la perdrix choukar *Alectoris chukar* (**Ouchia-Benissad et Ladjali-Mohammedi, 2018**). **q** : bras long, **p** : bras court, **t** : total (**p+q**), **r** : ratio (**q/p**). Les valeurs sont exprimées en micromètres (µm).

Chromosome	p	q	q/p	p+q
1	5,63	8,82	1.56	14.45
2	3.83	6.76	1.76	10.59
3	1.2	7.5	6.25	8.7
4	1.15	6.19	5.38	7.43
5	0.78	4.9	6.28	5.58
6	0.75	3.35	4.46	4.1
7	0.7	3	4.28	3.7
8	0.63	2.37	3.76	3
Z	3.1	3.5	1.12	6.6
W	0.93	1.37.	1.47	2.3

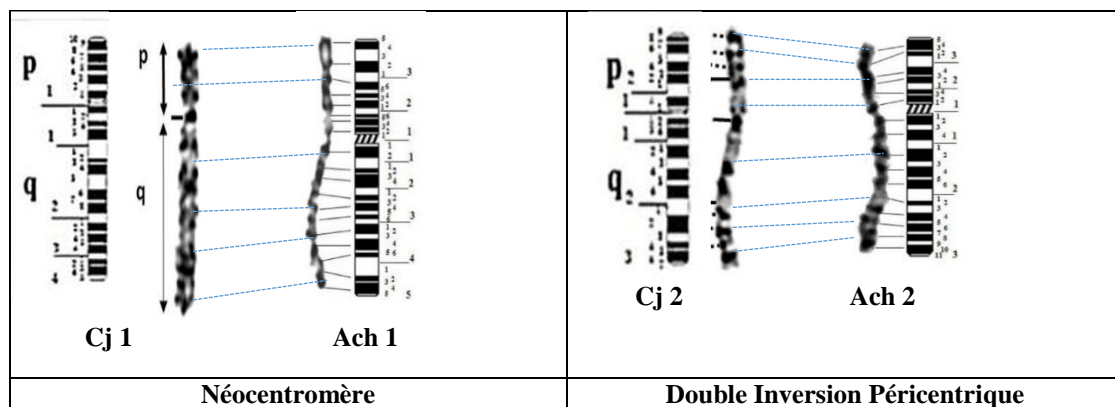
Tableau 4 : Morphométrie des chromosomes de la caille japonaise *Coturnix japonica* (**Kartout-Benmessaoud-et Ladjali-Mohammedi, 2018**). **q** : bras long, **p** : bras court, **t** : total (**p+q**), **r** : ratio (**q/p**). Les valeurs sont exprimées en micromètres (µm).

Chromosome	p	q	q/p	p+q
1	1,3	2,8	2,15	4,1

Chapitre III Analyse chromosomique comparative entre La Caille japonaise, le Poulet domestique et la Perdrix choukar

2	1.25	1.66	1.32	2.91
3	0.14	2	14.28	2.14
4	0.32	1.7	5.31	2.02
5	0.15	1.11	7.4	1.26
6	0.08	0.76	9.5	0.84
7	0.1	0.66	6.6	0.76
8	0.24	0.47	1.95	0.71
Z	0.96	1.05	1.09	2.06
W	0.18	0.92	5.11	1.1

D'après les analyses chromosomiques antérieures (**Ouchia-Benissad, 2019 ; Kartout-Benmessaoud et Ladjali-Mohammed, 2018 ; Karkout-Benmessaoud, 2019**) et après comparaison des motifs de bandes GTG entre les trois galliformes étudiés dans le présent travail, nous avons pu mettre en évidence des similitudes chromosomiques **entre la caille japonaise et la perdrix choukar**. Ces dernières ont été observées sur les chromosomes (3, 5, 6, 7 et Z). Néanmoins, quelques différences morphologiques ont été observées notamment sur les chromosomes (1, 2, 4, 8 et W) (**figure 23**).



Chapitre III Analyse chromosomique comparative entre La Caille japonaise, le Poulet domestique et la Perdrix choukar

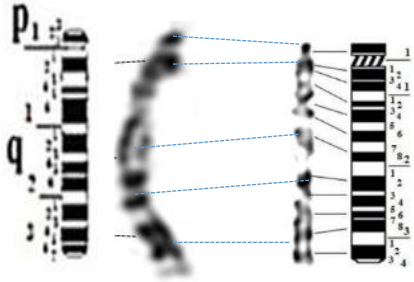
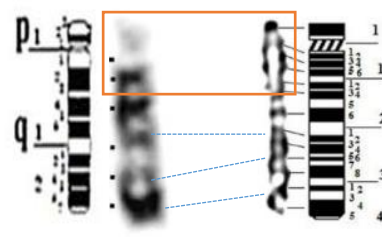
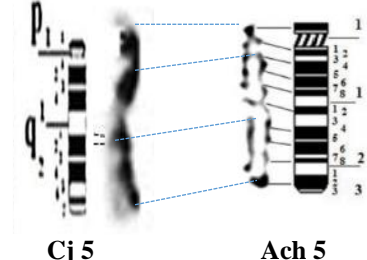
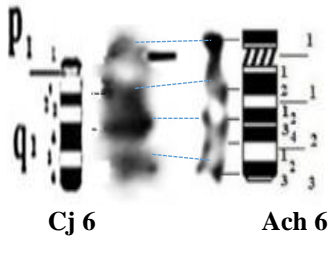
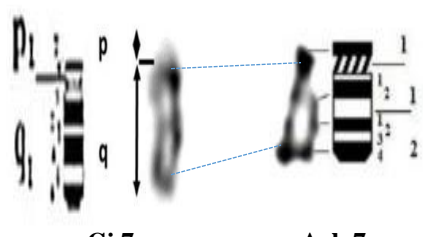
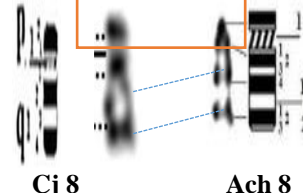
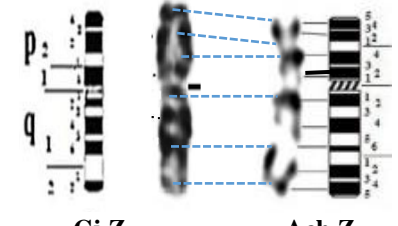
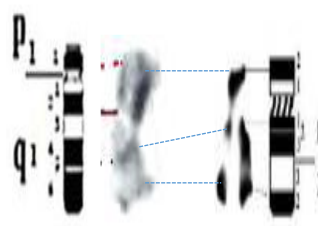
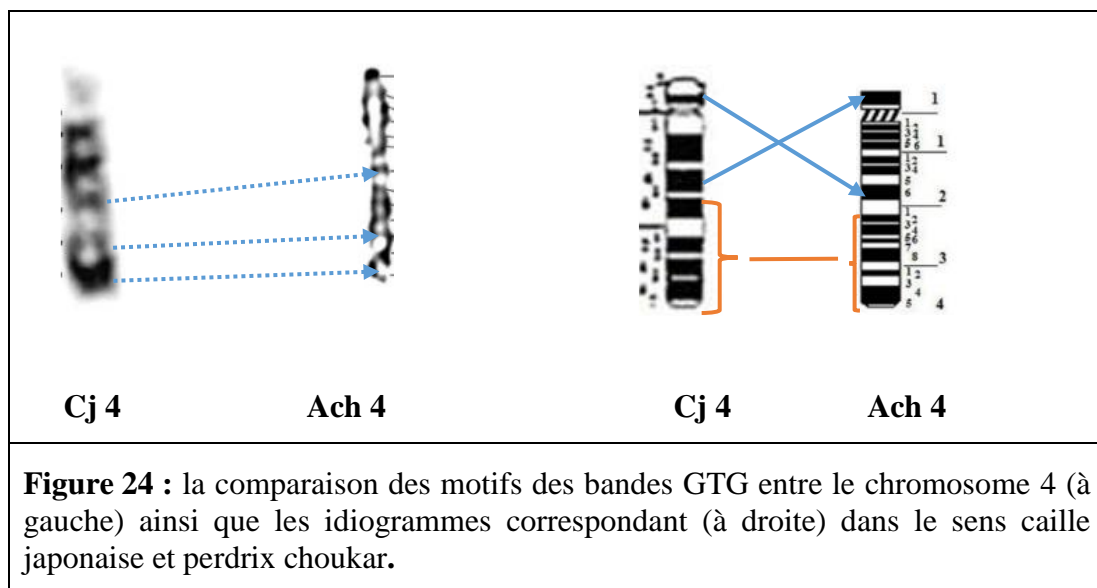
 <p>Cj 3 Ach 3</p>	 <p>Cj 4 Ach 4</p>
<p>Acrocentriques</p>	<p>Acrocentriques Subtélolocentriques</p>
 <p>Cj 5 Ach 5</p>	 <p>Cj 6 Ach 6</p>
<p>Acrocentriques</p>	<p>Acrocentriques</p>
 <p>Cj 7 Ach 7</p>	 <p>Cj 8 Ach 8</p>
<p>Acrocentriques</p>	<p>Acrocentriques Submétacentriques</p>
 <p>Cj Z Ach Z</p>	 <p>Cj W Ach W</p>
<p>Submétacentrique métacentriques</p>	<p>Submétacentriques Subtélolocentrique</p>

Figure 23 : comparaison des huit premiers macrochromosomes ainsi que les deux gonosomes entre la caille japonaise *Coturnix japonica* et la perdrix choukar *Alectoris chukar* (originale).

IV-3 Réarrangements proposés entre la caille japonaise et la perdrix choukar

- **Chromosome 4**

Le chromosome 4 de la caille japonaise présente une différence morphologique par rapport au chromosome 4 de la perdrix choukar. Le chromosome 4 de la caille japonaise est Subtélocentrique alors que son homologue de la perdrix choukar est acrocentrique. La comparaison des motifs des bandes GTG a révélé la présence d'un réarrangement chromosomique, ce qui nous a permis de déceler une inversion des bandes au tour du centromère (**figure 24**). Cette dernière pourrait être expliquée par une inversion péricentrique qui se serait produite lors de l'évolution au niveau du chromosome 4 ancestral de la caille japonaise (**Figure 25**). Aussi, la présence d'un autre type de réarrangement chromosomique qui serait plus plausible est proposée dans la présente étude. Il pourrait s'agir non pas d'une inversion péricentrique mais de la formation d'un néocentromère. Ce dernier a pu être vérifié et confirmé grâce à des clones BAC (marqueurs moléculaires spécifique au poulet) (**Zlotina et al., 2012**).



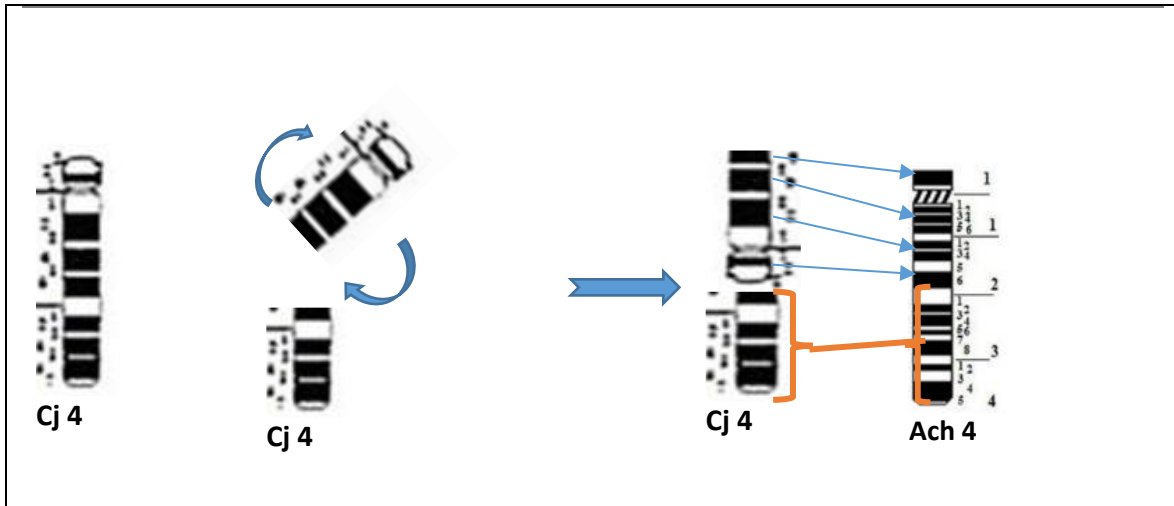
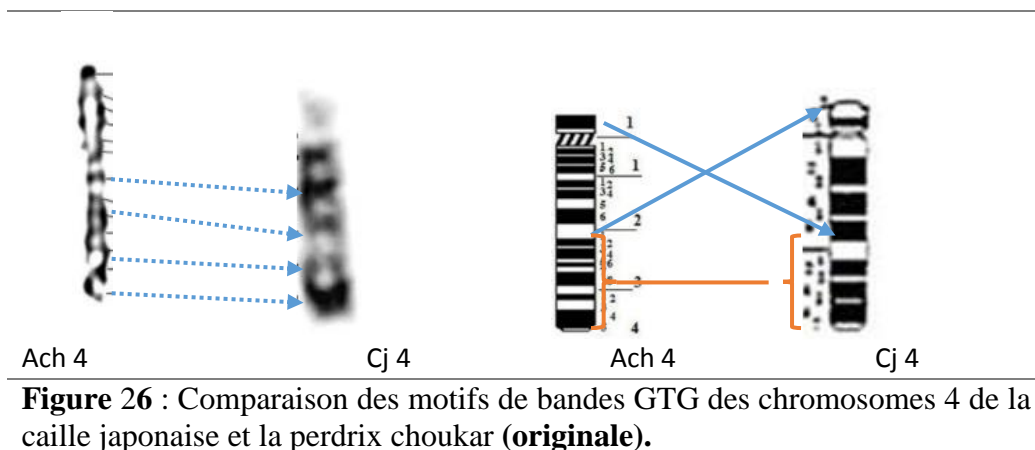


Figure 25 : Inversion péricentrique qui aurait pu se produire sur les chromosomes 4 ancestraux de la caille japonaise et de la perdrix choukar (**originale**).

La comparaison dans le sens perdrix choukar–caille japonaise montre aussi une inversion péricentrique avec des points de cassure qui seraient situés au niveau des bandes (p1.2-q3.1) (**figures 26 et 27**).



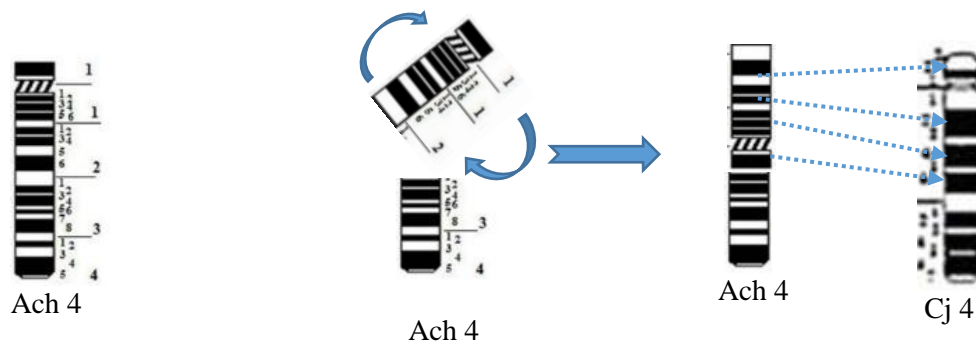


Figure 27 : Inversion péricentrique dans le sens perdrix choukar et la caille japonaise (**originale**).

Chromosome 8

Le chromosome 8 de la caille japonaise est submétacentrique. Contrairement à celui de la perdrix choukar qui est acrocentrique. La comparaison des motifs des bandes GTG de ces chromosomes a montré une différence dans la conservation des bandes (**Figure 28**). La présence d'un éventuel réarrangement chromosomique a été détectée, il s'agirait d'un repositionnement du centromère (**formation de néocentromère**) sur le chromosome 8 ancestral de la caille japonaise (**Figure 29**), ou bien le même réarrangement intrachromosomique serait probablement survenu sur le chromosome 8 ancestral de la perdrix choukar (**Figures 30**). Ces résultats ne peuvent être confirmés que par l'utilisation de marqueurs moléculaires spécifiques du poulet (clones BAC) bordant les centromères (**Mahieddine, 2020**).

Le repositionnement du centromère ou centromère *de novo* (Evolutionary New Centromere, ENC) est le mouvement d'un centromère le long du chromosome avec l'inactivation de l'ancien mais sans modification de l'ordre des marqueurs au cours de l'évolution (**Rocchi et al., 2012**). Cet événement complexe ne serait pas rare. En effet, plusieurs cas de formation de centromères *de novo* ont été rapportés chez la caille japonaise *Coturnix japonica* (**Galkina et al., 2006; Skinner et al., 2009; Zlotina et al., 2012**).

Chapitre III Analyse chromosomique comparative entre La Caille japonaise, le Poulet domestique et la Perdrix choukar

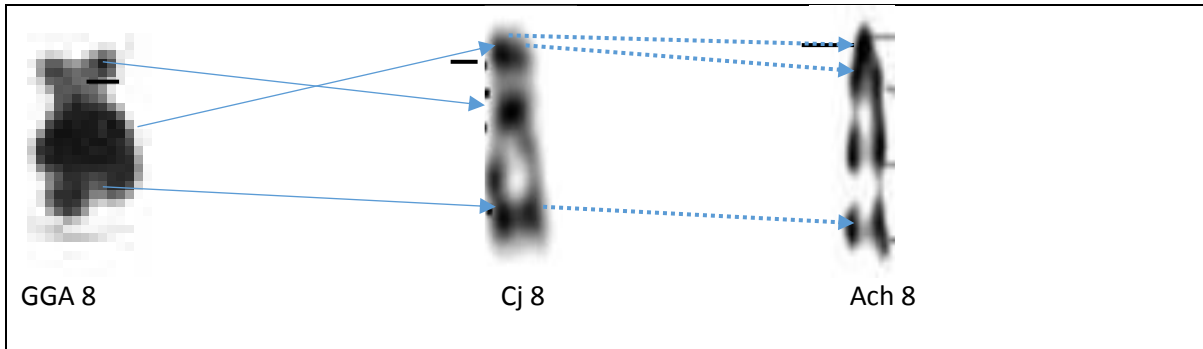


Figure 28 : Comparaison des bandes GTG des chromosomes 8 du poulet domestique de la caille japonaise et la perdrix choukar (**originale**).

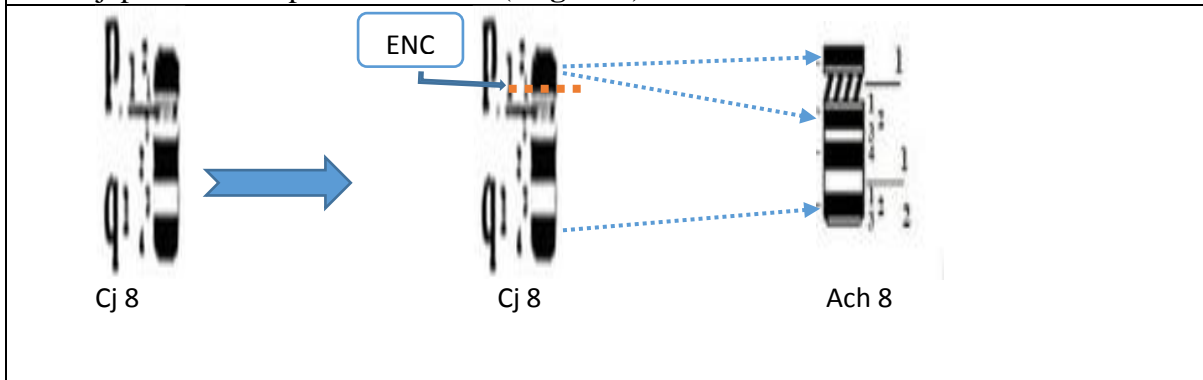
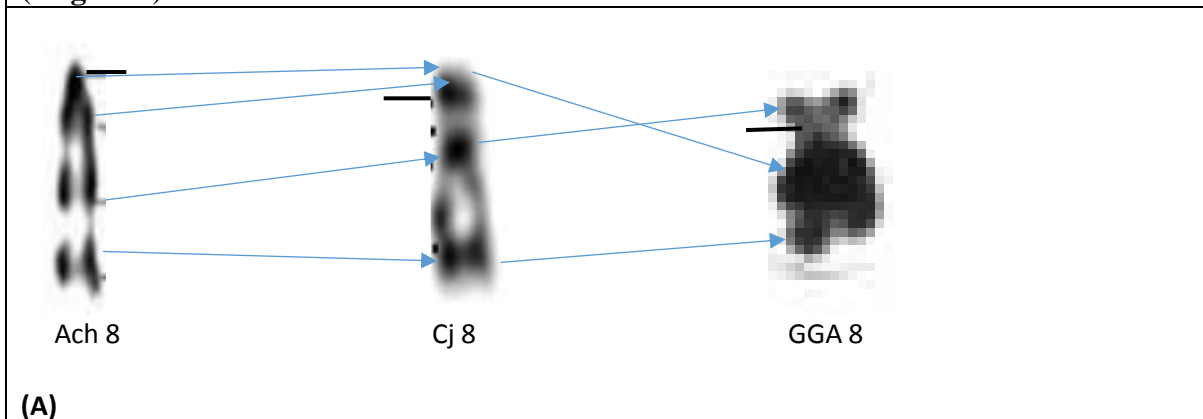
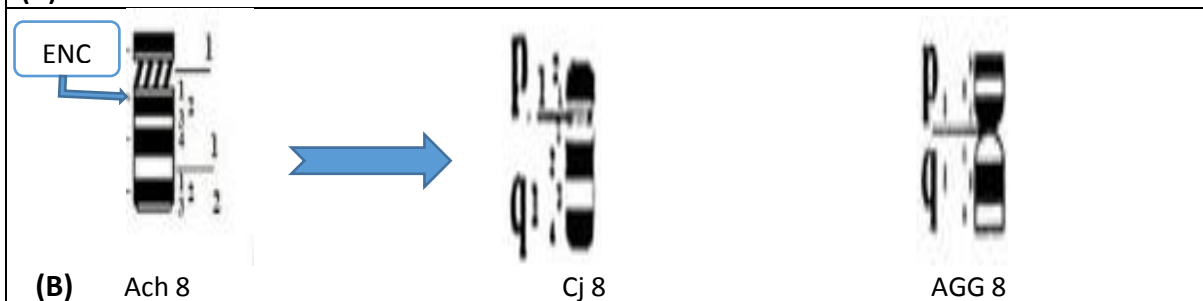


Figure 29 : Repositionnement du centromère (ENC : Evolutionary New Centromer) qui se serait produit sur le chromosome 8 ancestral de la caille japonaise au cours de l'évolution (**originale**).



(A)

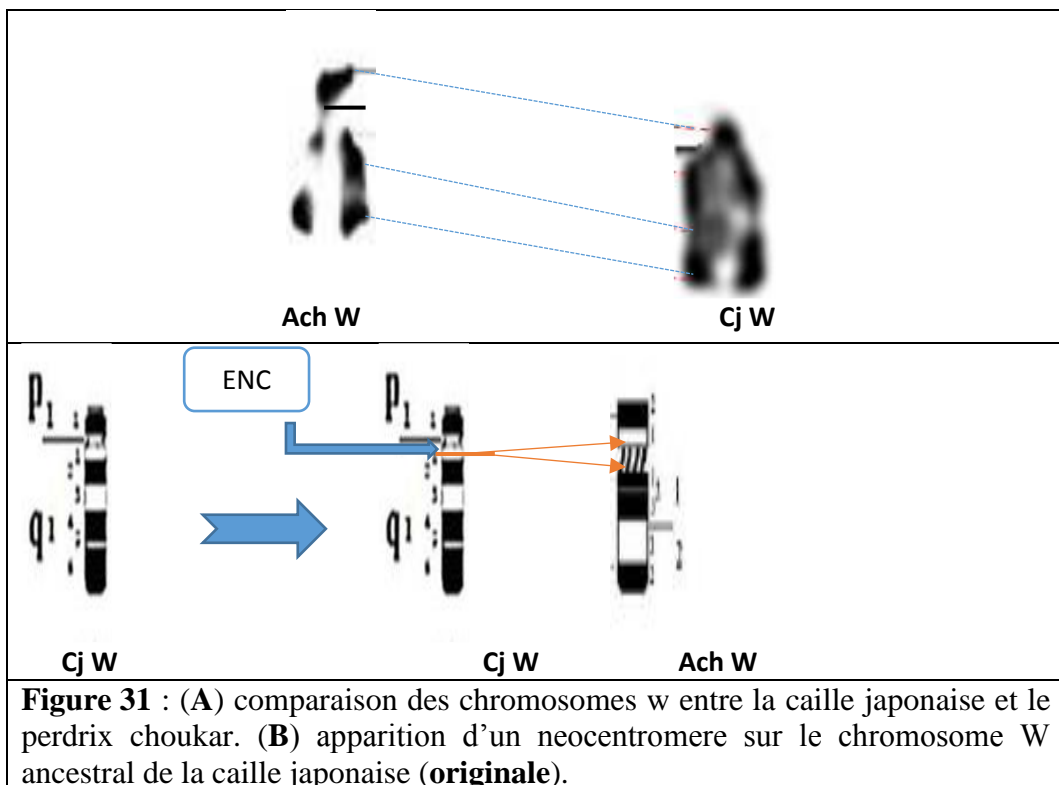


(B)

Figure 30 : (A) Comparaison entre les chromosomes 8 de la perdrix choukar et de la caille japonaise. (B) formation probable d'un néocentromère sur le chromosome 8 ancestral de la perdrix choukar (**originale**).

- **Chromosome W**

Une différence morphologique a été observée entre le chromosome W de la caille japonaise (Subtélodentriques) avec celui de la perdrix choukar (acrocentrique). Les analyses comparées des motifs de bandes GTG des chromosomes W ont montré que la position des centromères du chromosome W est semblable chez les deux espèces (**Figure 31 A**). Ce résultat pourrait s'expliquer par la formation d'un Néocentromère Evolutif (ENC) sur le chromosome ancestral de la caille japonaise au cours de l'évolution (**Figure 31 B**), ou bien sur celui de la perdrix choukar (**Figure 32**).



Avant d'imprimer

VERIFIEZ LA POSITION DES FLECHES (si y a des décalages) ! pour toutes les figures !!

Chapitre III Analyse chromosomique comparative entre La Caille japonaise, le Poulet domestique et la Perdrix choukar

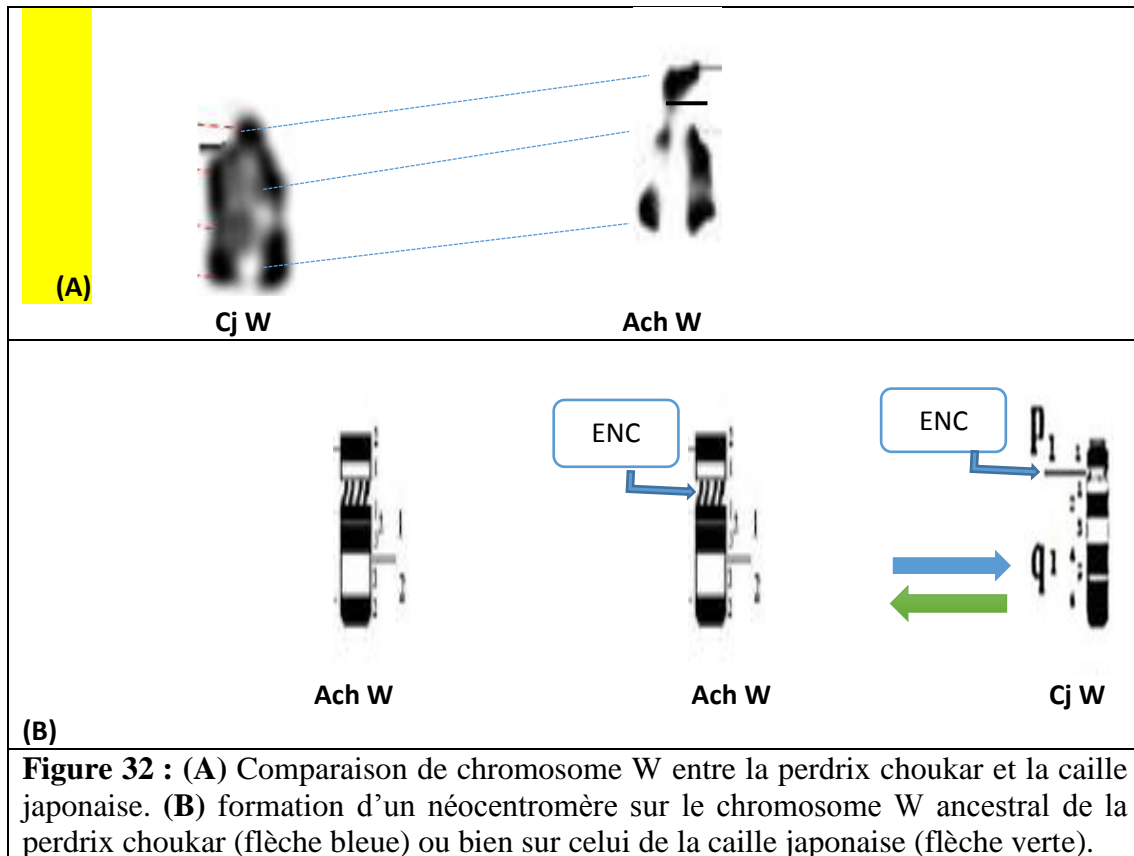


Figure 32 : (A) Comparaison de chromosome W entre la perdrix choukar et la caille japonaise. (B) formation d'un néocentromère sur le chromosome W ancestral de la perdrix choukar (flèche bleue) ou bien sur celui de la caille japonaise (flèche verte).

Bien que les mécanismes de la formation des ENC soient mal connus, ils semblent cependant être impliquer dans l'inactivation de l'ancien centromère et la formation d'un nouveau dans un locus euchromatique (Zlotina *et al.*, 2012). A notre connaissance, aucun réarrangement intrachromosomique n'a été rapporté par la littérature pour expliquer cette différence de morphologie observée sur les chromosomes W des deux espèces. Ces résultats ne peuvent être confirmés que par l'utilisation de marqueurs moléculaires spécifiques au poulet bordant les centromères (Kartout-Benmessaoud, 2019).

D'autre part, le récent séquençage du chromosome W du poulet, a révélé la conservation particulière des gènes ancestraux codant pour des régulateurs sensibles à l'effet de dosage ?? (Bellott *et al.*, 2017).

Chapitre III Analyse chromosomique comparative entre La Caille japonaise, le Poulet domestique et la Perdrix choukar

A l'issue des analyses réalisées dans la présente étude, nous pouvons conclure que la cartographie comparée montre une forte conservation des chromosomes entre les trois espèces étudiées. Ainsi, une très haute conservation des génomes **de la perdrix choukar et de la caille japonaise** a été démontrée, **pour la première fois, avec la présence de** quelques différences morphologiques et des motifs de bandes **GTG**. En effet, la comparaison des chromosomes de la caille japonaise et de la perdrix choukar a montré l'existence de quelques remaniements chromosomiques (à savoir une inversion péricentrique et la formation de néocentromères) notamment sur les chromosomes 4, 8 et W.

Par ailleurs, les chromosomes de la caille japonaise et du poulet domestique montrent **plusieurs** similitudes morphologiques notamment au niveau des chromosomes (3, 5, 6, 7, Z). Les différences **résideraient** au niveau des chromosomes (1, 2, 4, 8 et W) **et** qui ont été expliquées principalement par des néocentromères (haute conservation des motifs de bandes GTG) (**Kartout-Benmessaoud, 2019**).

Cependant, les chromosomes (4, 7 et 8) de la perdrix choukar **présenteraient** aussi des différences morphologiques avec ceux du poulet domestique. Principalement, des inversions paracentriques ont été plutôt proposées (**Ouchia-Benissad, 2019**).

Nous prouvons déduire que la caille japonaise divergerait du poulet domestique alors que la perdrix choukar serait apparu à part en divergent directement de l'espèce aviaire ancestrale (**figure 33**).

A l'issue des résultats obtenus, nous pouvons conclure que la cartographie chromosomique comparée est un moyen efficace pour mettre en évidence les remaniements liés aux changements de morphologie et des profils des bandes GTG. Malgré une forte conservation des chromosomes aviaires, le nombre de réarrangements intrachromosomiques ne semble pas être négligeable. Les inversions péricentriques ne sont pas le principal mécanisme à l'origine des remaniements. En effet, les centromères de certains chromosomes semblent être formés **de novo** (**Figure 33 et 34**) (**Galkina et al., 2006; Zlotina et al., 2012; Ouchia-Benissad et Ladjali-Mohammedi, 2018; Kartout-Benmessaoud et Ladjali-Mohammedi, 2018**).

Chapitre III Analyse chromosomique comparative entre La Caille japonaise, le Poulet domestique et la Perdrix choukar

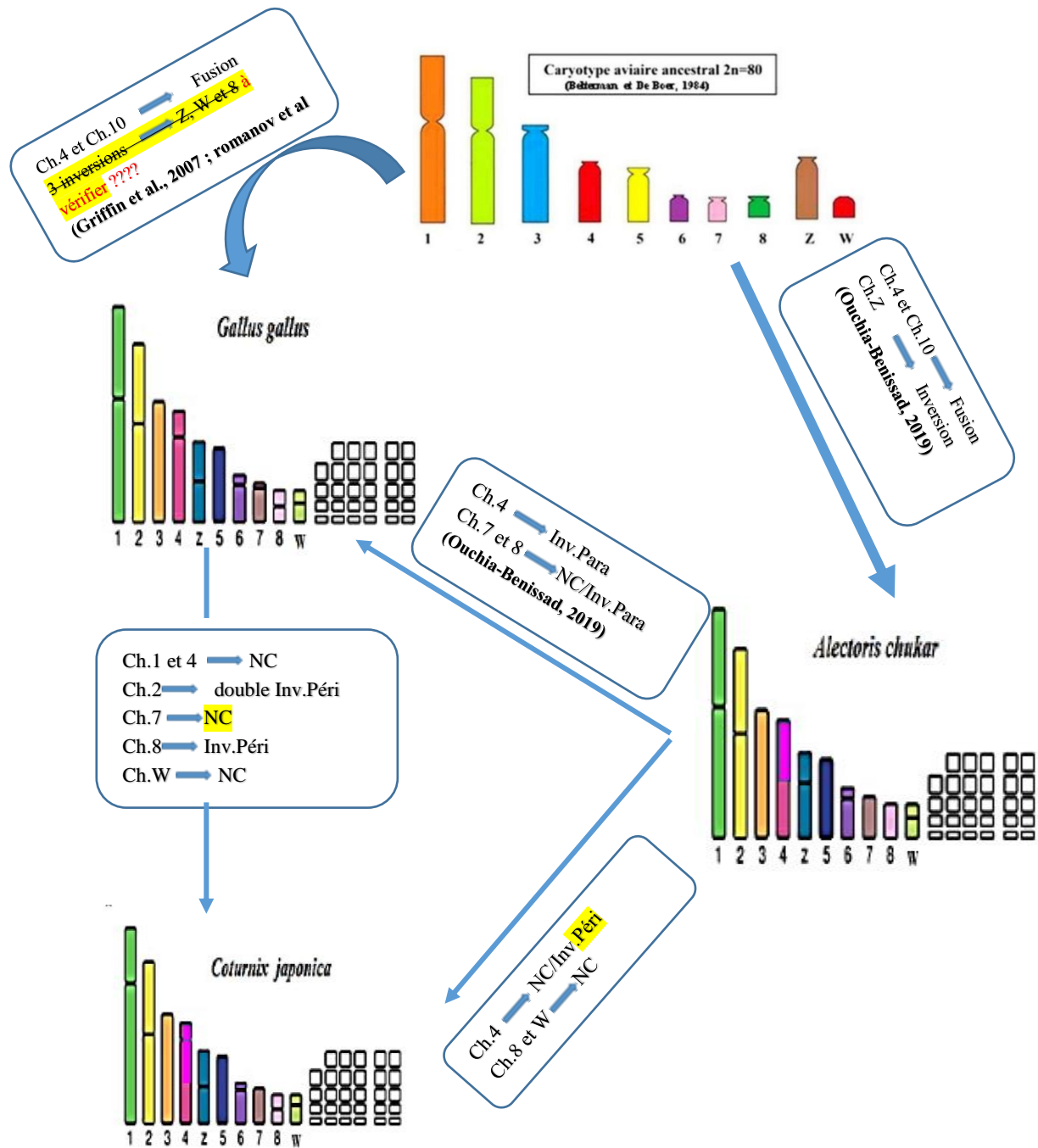


Figure 33 : Schéma récapitulatif des éventuels réarrangements intrachromosomiques qui auraient survécu au cours de l'évolution sur huit premiers autosomes et les deux gonosomes ZW de trois espèces de galliformes : poulet domestique *Gallus gallus domesticus*, caille japonaise *Coturnix japonica* et perdrix choukar *Alectoris chukar* (originale).

Carrés blancs : microchromosomes, NC : NéoCentromère, Inv. Peri. : Inversion Péricentrique, Inv. Para. : Inversion Paracentrique, Del. Ter. : Délétion Terminal

Gardez les même couleurs des chromosomes pour tous les caryotypes (revoez le caryotype ancestral !!) : les chr 1 en vert, chr 2 en jaune,

Chapitre III Analyse chromosomique comparative entre La Caille japonaise, le Poulet domestique et la Perdrix choukar

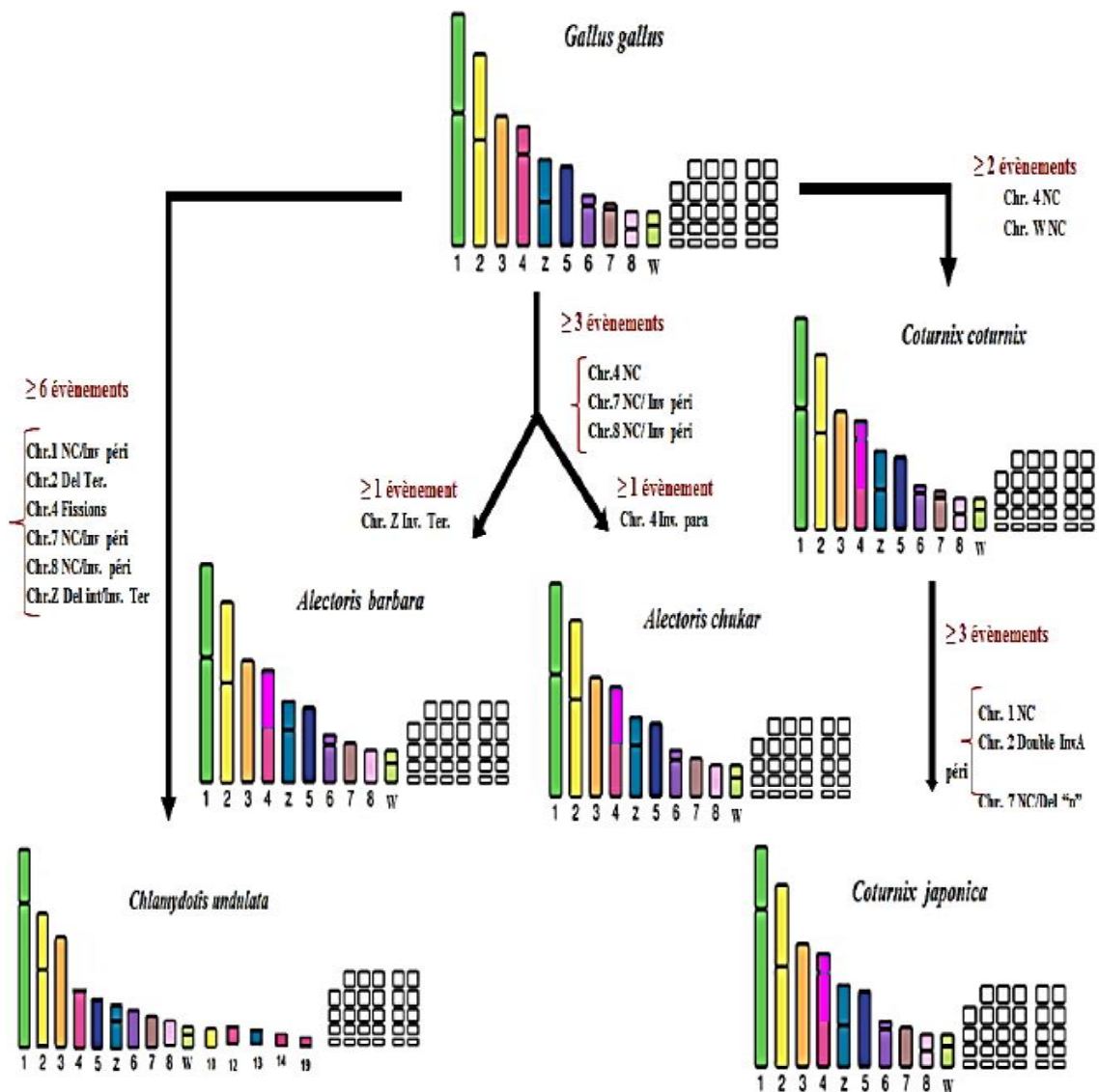


Figure 34 : Représentation schématique des différents événements de réarrangements qui se seraient déroulés lors de l'évolution des chromosomes du poulet (proche du caryotype ancestral, et ceux de l'outarde houbara, la perdrix gabra, la perdrix choukar, la caille des blés et la caille japonaise (Mahieddine, 2020).

Carrés blancs : microchromosomes, NC : NéoCentromère, Inv. Peri. : Inversion Péricentrique, Inv. Para. : Inversion Paracentrique, Del. Ter. : Délétion Terminale, Del. Int. : Délétion Intercalaire.

Conclusion

Conclusion



Conclusion

Dans la présente étude, nous avons contribué à la réalisation d'une cartographie comparée entre les huit premiers macrochromosomes et les gonosomes ZW de la caille japonaise *Coturnix japonica* et la perdrix choukar *Alectoris chukar*.

D'après les analyses cytogénétiques comparatives antérieures et malgré la très bonne conservation des génomes aviaires notamment des Galliformes ; quelques différences morphologiques ont été observées sur les chromosomes de la caille japonaise et de la perdrix choukar. En effet, la comparaison morphologique et des motif de bandes GTG de leurs huit premières paires chromosomiques et des chromosomes sexuels ZW, nous a permis de constater l'existence de différences seulement au niveau des chromosomes 4, 8 et W. Cependant, les chromosomes 1, 2, 3, 5, 6, 7 et Z présentent des similitudes morphologiques. Une inversion péricentrique et des repositionnements de centromères (Formation de néocentromères) ont été ainsi proposés comme réarrangements intrachromosomiques qui se seraient produit au cours de la spéciation.

Cependant, des remaniements intrachromosomiques ont été rapportés sur les chromosomes 1, 2, 4, 7, 8 et W (de types inversions péricentriques et néocentromères) du poulet domestique et de la caille japonaise (**Kartout-Benmessaoud, 2019**), et sur les chromosomes 4, 7 et 8 du poulet domestique et de la perdrix choukar (notamment des inversions paracentriques) (**Ouchia-Benissad, 2019**).

A l'issu des résultats obtenus et vu que le poulet domestique représente l'espèce la plus proche de l'ancêtre aviaire (**Griffin et al, 2007**), on peut supposer que le poulet est l'espèce la plus ancestrale parmi les trois espèces étudiées dans le présent travail et que la caille japonaise aurait divergé du poulet domestique alors que la perdrix choukar aurait divergé directement de l'espèce ancestrale.

Afin de confirmer les réarrangements proposés dans le présent travail, des études moléculaires plus approfondies utilisant le maximum de clones BAC (marqueurs moléculaires spécifiques au poulet) seront réalisées. Ces derniers seront hybridés sur des métaphases de la caille japonaise et de la perdrix choukar (**Fillon, 1998 ; Kartout-Benmessaoud, 2019 ; Ouchia-Benissad, 2019 ; Mahieddine, 2020**).

Ainsi, une description individuelle des microchromosomes de ces espèces étudiées sera aussi effectuée par la technique d'hybridation *in situ* en fluorescence (**FISH**) (**Zoorob et al., 1996 ; Galkina et al., 2017**).

Conclusion

Afin de mieux retracer l'évolution des génomes de ces deux espèces, des études phylogénétiques seront réalisées par l'utilisation d'un nombre important de marqueurs mitochondriaux, ce qui rendraient les arbres phylogénétiques plus fiables (**Awad *et al.*, 2015 ; Wink, 2019**).

Références

Ne les oubliez pas !!

Résumé

La caille japonaise *Coturnix japonica* est un petit oiseau originaire du Japon et de Chine, appartenant à l'ordre des Galliformes et à la famille des Phasianidés. Elle est utilisée comme un modèle animal de laboratoire. La perdrix choukar *Alectoris chukar* est aussi une espèce de l'ordre des Galliformes, introduite en Algérie en 1972. Elle est considérée par les chasseurs européens parmi les espèces précieuses en Espagne. Le présent travail vise à proposer une éventuelle relation évolutive qui existerait entre ces deux espèces tout en les comparant avec le poulet domestique *Gallus domesticus* (considéré comme le standard aviaire). Ce travail consiste à contribuer par une étude bibliographique à une analyse cytogénétique classique comparative des huit premières paires autosomiques ainsi que les chromosomes sexuels ZW des espèces étudiées. La comparaison de la morphologie et des motifs de bandes GTG suggère que l'homologie chromosomique est hautement conservée entre la caille japonaise et la perdrix choukar sur la plupart des chromosomes (1.2.3.5.6.7. et Z) mis à part l'existence de quelques différences morphologiques sur les chromosomes (4, 8 et le W). Cependant, les différences ont été expliquées par certains réarrangements intrachromosomiques de type inversion péricentrique et formation de néocentromères qui auraient pu se produire au cours de l'évolution.

Mots clé : caille japonaise *Coturnix japonica*, perdrix choukar *Alectoris chukar*, bandes GTG, réarrangements intrachromosomiques, évolution.

Abstract

The Japanese quail *Coturnix japonica* is a small bird of Japanese and Chinese origin belonging to the family Phasianidae and the order Galliformes. She is used as an animal model laboratory. The partridge choukar *Alectoris chukar* is also a species of the order Galliformes introduced in Algeria in 1972. It is considered by European hunters among the precious species in Spain. The present work aims to give the evolutionary origin that exists between these two species while comparing with domestic chicken *Gallus domesticus* (considers the avian standard). this study consists in contributing by bibliographic and a comparative classical cytogenetic study of the first eight autosomal pairs and the ZW sex chromosomes of the species studied. Comparison of the morphology and GTG band patterns suggests that chromosomal homology is highly conserved between Japanese quail and partridge choukar on most chromosomes (1.2.3.5.6.7. et Z) apart from the existence of some morphological differences (4, 8 et le W). However, these differences have been explained by different intrachromosomal rearrangements such as pericentric inversion and neocentromer formation that would have occurred during evolution.

Keywords: Japanese quail *Coturnix japonica*, partridge choukar *Alectoris chukar*, GTG band, intrachromosomal rearrangements, evolution.