

# Effets du pâturage sur le couvert végétal et la qualité des sols dans les parcours des zones arides

M. SABIR<sup>1</sup>, M. QARRO<sup>1</sup>, M. NAIMI<sup>2</sup>

(Reçu le 06/04/2021; Accepté le 28/07/2021)

## Résumé

Les parcours constituent une composante importante des systèmes de production. Leur utilisation pose plusieurs questions concernant leur durabilité. En effet, la charge animale impacte leur fonctionnement écologique. Ce papier synthétise les impacts du pâturage sur le couvert végétal et le sol des parcours dans les zones arides et semi-arides. Les impacts du pâturage sur le couvert végétal, les caractéristiques de l'état de surface et les propriétés hydro-dynamiques du sol dépendent d'une part, des caractéristiques de l'écosystème (sol, végétation, climat), et d'autre part de l'intensité et la fréquence du pâturage. Le pâturage réduit en particulier la couverture végétale du sol et impacte sa structure, sa composition et son étendue. Avec le temps, la qualité du couvert végétal régresse et sa productivité fourragère diminue. Dans les écosystèmes pastoraux humides, le pâturage tasse la surface du sol à cause de la charge animale élevée. Ce tassement associé à une réduction du couvert végétal se traduit par une diminution de la capacité d'infiltration du sol et une augmentation du ruissellement et de l'érosion. Par contre, dans les zones arides, les effets du pâturage sur les caractéristiques du sol sont variables. Des études ont montré que le sol est tassé quand la charge animale est élevée. D'autres ont signalé que le piétinement animal n'a pas d'effet de tassement sur le sol. Les différences constatées sont dues au type de sol, à l'humidité et à la nature du pâturage. Le pâturage léger ou modéré, caractérisé par une circulation adéquate des animaux permet d'utiliser durablement les parcours.

**Mots clés:** Parcours, Pâturage, Couvert végétal, Caractéristiques des sols, Comportement hydrologique des sols

## Effects of grazing on vegetation cover and soil quality in rangelands of arid regions

### Abstract

Rangelands constitute a significant component of the production systems. Their use raises several questions regarding their durability. Indeed, the stocking density impacts their ecological functioning. This paper reviews the impacts of grazing on vegetation cover and soil quality of rangelands in arid and semi-arid regions. The impacts of grazing on vegetation cover, surface soil characteristics and hydrodynamic properties of soils depend on the one hand, on ecosystem characteristics (soil, vegetation, climate), and on the other hand on grazing intensity and frequency. In particular grazing reduces soil vegetation cover and impacts its structure, composition and extent. With time, the quality of vegetation cover regresses and its fodder productivity decreases. In humid pastoral ecosystems, grazing packs soil surface because of the high stocking density. This soil packing associated with a reduction of vegetation cover implies a reduction of soil infiltration capacity and an increase of runoff and erosion. On the other hand, in arid regions, the effects of grazing on soil characteristics are variable. Some studies showed that the soil is packed when the stocking density is high. Others pointed out that animal trampling does not impact soil packing. Observed differences are mainly due to soil type, moisture and the nature of grazing. Limited or moderate grazing, characterized by appropriate movement of animals makes allow for sustainable use of rangelands.

**Keywords:** Rangelands, Grazing, Vegetation cover; Soil characteristics; Hydrological behavior of soils

## INTRODUCTION

Depuis quelques décennies, l'étude du fonctionnement des écosystèmes pastoraux a reçu une attention particulière, notamment l'étude des effets du pâturage sur le sol, en vue d'un usage optimal et soutenu. Les résultats disponibles à travers le monde montrent que l'impact du pâturage sur l'état de surface du sol et sur son comportement hydrologique est très variable selon les caractéristiques de l'écosystème (sol, climat, végétation), le type, l'intensité, le timing et la durée du pâturage (Sabir, 1994; Bourbouze et Qarro, 2000; Qarro *et al.*, 2010).

Les animaux doivent être certainement considérés en tant que facteur environnemental de l'écologie et de la dynamique des écosystèmes pastoraux et des pâturages. Leurs impacts sur le milieu, dans les mêmes conditions écologiques, varient en fonction du type de pâturage et de la charge animale exercée. Il y a lieu de distinguer entre pâturage contrôlé et surpâturage incontrôlé. Le pâturage contrôlé est défini comme étant une utilisation des parcours qui assure leur conservation et la durabilité de leur production de biomasse, et où les prélèvements par les animaux n'excèdent pas la moitié de la production pendant une

période donnée (Frame, 1971). Cette activité peut avoir lieu continuellement durant toute l'année ou durant une ou plusieurs périodes discontinues (Nahal, 1975; Qarro *et al.*, 2010).

Par contre, le surpâturage incontrôlé pendant une durée relativement longue, épuise les parcours. Le processus a été décrit par plusieurs auteurs, entre autres, Ellison (1960), Descroix *et al.* (2000), Qarro *et al.* (2010) et Bechchari *et al.* (2014). Les espèces les plus palatables sont souvent broutées, rendant ainsi les moins palatables plus dominantes. Ceci entraîne inévitablement un avantage de compétition en faveur de ces dernières. A cause d'une plus forte disponibilité en eau et en lumière, la croissance est fortement favorisée. En outre, le pâturage incontrôlé peut empêcher le développement des espèces palatables du fait que le bétail broute les jeunes plantules. A la longue, même les espèces peu palatables sont broutées. La diminution des ressources fourragères entraîne une circulation plus intense des animaux, ce qui induit une détérioration du couvert végétal par piétinement. Par conséquent, le sol devient nu et dépourvu de résidus organiques pour sa protection. La matière organique en particulier diminue, rendant le sol

<sup>1</sup> École Nationale Forestière d'Ingénieurs, Salé, Maroc

<sup>2</sup> Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat, Maroc

moins cohérent et plus sensible à l'érosion. La capacité d'infiltration diminue, le ruissellement augmente et les processus d'abrasion et d'érosion du sol se déclenchent. Il y a moins d'eau stockée dans le sol, et la perte en éléments nutritifs s'accroît. Le processus peut continuer jusqu'à la disparition totale du couvert végétal et du sol.

## EFFETS DU PÂTURAGE SUR LA VÉGÉTATION

### Structure de la végétation

Le pâturage des animaux, selon son intensité et sa durée, par ses effets sur la longévité, la reproduction et l'installation des espèces végétales, affecte la composition floristique des parcours (Ellison, 1960; West *et al.*, 1984; Sabir *et al.*, 1993; Qarro *et al.*, 2010).

A cause de son effet positif sur les conditions d'installation des espèces végétales, le pâturage contrôlé peut permettre le développement de plusieurs espèces et par conséquent une diversité floristique plus importante. Par contre, à charges élevées, la pression animale peut aboutir à une homogénéité du couvert végétal avec un nombre réduit d'espèces, souvent plus résistantes et moins palatables. Sous un pâturage incontrôlé de longue durée, une ouverture du peuplement peut avoir lieu avec peu d'espèces végétales représentées (Gounot, 1969; Bowns et Bagley, 1986; Weeda et During, 1987; Sabir *et al.*, 1993; Kakinuma and Takatsuki, 2008).

Alaoui (1985) et Sabir *et al.* (1993) ont rapporté que, dans un périmètre aride et steppique, les densités des principales espèces végétales (*Artemisia herba-alba*, *Stipa parviflora*, *Koeleria vallesiana*, *Dactylis glomerata*) ont été réduites par le pâturage et plusieurs espèces ont même disparu sous pâturage incontrôlé pendant 4 années.

### Recouvrement de la végétation

Le recouvrement est défini comme étant le pourcentage de surface du sol couvert par les parties aériennes de la végétation vivantes ou mortes (Gounot, 1969; Rey *et al.*, 2004). Il joue un rôle très important dans la protection du sol contre l'érosion (Moir *et al.*, 2000; Sabir *et al.*, 2004; Rey *et al.*, 2004; Sabir et Roose, 2017).

L'effet du pâturage sur le recouvrement de la végétation est dû à deux actions simultanées de l'animal: le broutage et le piétinement. Le broutage a le plus souvent une action partielle de prélèvement sur les plantes, mais parfois un déracinement complet peut s'observer. Le piétinement, par l'action mécanique des sabots, provoque une cassure des tiges et des feuilles. Par l'action de battage qu'il a sur les résidus de surface, il permet d'une part, leur incorporation dans le sol, mais d'autre part, il favorise leur transport par des ruissellements éventuels (Brown et Schuster, 1969; Quinn et Hervey, 1970; Gamoun, 2012; Djibo *et al.*, 2018). Dans ce sens, Reed et Peterson (1961) notent que la couverture du sol par la litière est plus réduite sous pâturage modéré que sous pâturage léger, et elle l'est encore plus sous pâturage incontrôlé. De manière générale, plus la pression du pâturage est élevée, plus le couvert végétal est réduit (Tukel, 1984; Sabir *et al.*, 1993; Qarro *et al.*, 2010; Ndotam Tatila *et al.*, 2017). Sabir (1994) a observé, dans un milieu steppique, que le couvert végétal passe de 35% dans la parcelle témoin (mise en défens) à 12% sous pâturage modéré (2 brebis/ha/an) et à 8% sous pâturage incontrôlé (4 brebis/ha/an) après 3 ans de pâturage. Avec 8 brebis/ha/an,

le couvert végétal a été réduit à 4% après 8 mois de pâturage et le sol est pratiquement devenu nu et tassé en surface.

Dans les parcours à pâturage incontrôlé de l'Oriental marocain, le recouvrement de la végétation est passé de 34 % dans des sites protégés à 19 et 9 %, respectivement pour des sites modérément et fortement pâturés (Loiseau et Sebillotte, 1972). Dans un milieu aride et steppique, El Bare (1985) et Alaoui (1985) ont rapporté aussi que l'augmentation de la charge animale réduit le couvert végétal. En effet, le pâturage pendant 11 mois (octobre 1984 à août 1985) a montré que le recouvrement de la végétation a été de 39,7; 36,1; 29,4 et 25,8 %, respectivement pour les niveaux de charge 0; 0,7; 1 et 3 brebis/ha/an.

### Productivité de la végétation

Le pâturage par les animaux domestiques affecte la productivité des parcours par le fait qu'il agit sur le développement normal de la végétation. Certains auteurs ont montré que plus la charge animale est élevée, plus la production de la végétation est réduite (Bowns et Bagley, 1986; Jeffries et Klopatek, 1987; Sabir *et al.*, 1992; Hamel *et al.*, 2019). Par contre, d'autres auteurs, entre autres Reardon et Merrill (1976), Holechek (1980) et McGregor *et al.* (2009) ont rapporté que le pâturage contrôlé peut améliorer la productivité de la végétation, contrairement au pâturage incontrôlé (surpâturage). McNaughton (1983) et Rossignol (2006) ont en particulier signalé que les plantes ont un seuil de tolérance vis-à-vis du pâturage.

De manière générale, la réduction de la productivité des parcours, sous l'effet du pâturage incontrôlé, entraîne une pression plus forte sur la végétation. A long terme, ceci se traduit par une diminution du couvert végétal protecteur du sol (Holechek, 1980; Sabir *et al.*, 1993; Rey *et al.*, 2004).

Dans un milieu steppique à armoise, El Bare (1985) et Alaoui (1985), ont montré que l'impact du pâturage sur la phytomasse appétable totale varie selon la saison. Le premier a travaillé durant l'automne et l'hiver et le second durant le printemps et l'été de la même année. Les niveaux de charge utilisés sont de 0 (témoin), 0,7 (charge faible), 1 (charge modérée) et 3 brebis/ha/an (charge forte). Durant l'automne et l'hiver, la phytomasse appétable totale a été en moyenne de 221,5; 178,6; 168,1 et 138,9 kg MS/ha, respectivement pour les niveaux de charge témoin, faible, modéré et fort. Les différences entre les traitements ne sont pas significatives ( $p > 0,05$ ) entre le témoin et les autres niveaux de charge, mais significatives entre la charge faible et les autres niveaux de pâturage. Par contre, durant le printemps et l'été, l'impact du pâturage a été plus marqué. En effet, la phytomasse appétable totale moyenne durant cette période a été de 57,0; 128,6; 155,1 et 291,9 kg MS/ha, respectivement, pour les niveaux de charge fort, modéré, faible et témoin. Les différences entre les traitements ne sont pas significatives entre les niveaux modéré et faible.

## EFFET DU PÂTURAGE SUR LES CARACTÉRISTIQUES DU SOL

L'état de surface du sol, défini comme étant la composition et l'organisation de la surface à un instant donné (Escadafal, 1989), est l'un des facteurs les plus déterminants de son aptitude à absorber et à stocker l'eau (Casenave et Valentin, 1989 et 1992). Cette caractéristique a une grande importance dans le contrôle du ruissellement, de l'érosion et de la production fourragère (Hanks, 1965). Dans les parcours,

cet état de surface est influencé par la nature du sol (texture, matière organique et structure), le régime climatique (variation saisonnière de l'humidité et de la température), et le type et l'état de développement de la végétation.

Dans les sols de parcours et en conditions comparables, l'état de surface est affecté par le pâturage, à la fois par le prélèvement du matériel végétal (Bowns et Bagley, 1986; Thurow *et al.*, 1988) et par le tassement du sol (Gifford *et al.*, 1977; Naeth *et al.*, 1991; Sabir, 1994).

Les effets mécaniques des sabots d'animaux en pâturage, peuvent causer des pertes et des dommages physiques à la végétation ainsi que des modifications de l'état de surface du sol (Dadkhah et Gifford, 1980; Balph et Malecheck, 1985; Pietola *et al.*, 2005; Hiltbrunner *et al.*, 2012; Ali *et al.*, 2020).

Le sabot de l'animal en déplacement, exerce des forces sur la surface du sol dans trois directions: verticale du haut vers le bas (poids), sagittale de l'avant vers l'arrière (propulsion) ou inversement (freinage) et latérale de l'intérieur du corps vers l'extérieur (équilibre). Les amplitudes de ces forces varient selon les membres (antérieurs ou postérieurs) et la nature du déplacement (marche, trot ou galop) (Budsber et Verstraete, 1987; Hamidouch, 1988). Ceci montre qu'un animal en marche peut avoir deux actions simultanées sur la surface du sol: un tassement et une pulvérisation.

Habituellement, l'effort qu'exerce le piétinement animal sur la surface du sol est exprimé en termes de pression. Celle-ci peut être calculée en divisant le poids de l'animal par la surface totale de ses quatre sabots au contact du sol (Lull, 1959). Cette pression statique exercée par l'animal en position d'arrêt peut augmenter de 2 à 4 fois quand il est en mouvement. La pression peut varier selon la fraction du sabot qui est effectivement en contact avec le sol (Lull, 1959; Hammidouch, 1988). Le tableau 1 montre les valeurs expérimentales de la pression exercée pour quelques espèces animales.

### Litière et matière organique du sol

Ces deux composants jouent un rôle très important dans l'amélioration de la structure du sol et sa protection contre l'érosion (Blackburn, 1983; Merzouk, 1985; Grosbellet, 2008). La litière constitue pour le sol, un écran protecteur contre les gouttes de pluie d'une part, et un réservoir de matière organique d'autre part (Young, 1987; Roose, 1994; Le Bissonnais, 1996). La matière organique permet au sol d'avoir une bonne structure qui lui confère une porosité adéquate pour assurer une bonne perméabilité à l'eau et une bonne fertilité (Hamblin, 1982; Wood et Blackburn, 1984; Peres *et al.*, 2013). La quantité de la litière naturelle et de la matière organique dans les sols des parcours dépend de la nature du couvert végétal et des conditions écologiques qui affectent la production (Rauzi et Hanson, 1966; Wood

et Blackburn, 1984; Gamougoun *et al.*, 1984; Jalilvand *et al.*, 2007; Du *et al.*, 2019). Cependant, le pâturage, par le piétinement de la surface du sol, selon son intensité et la nature du sol, a des effets sur la litière et sur la teneur en matière organique (Wood et Blackburn, 1984; Jalilvand *et al.*, 2007). En effet, plusieurs auteurs, entre autres Gamougoun *et al.* (1984) et Amiri *et al.* (2008) ont noté que la réduction de la charge animale sur les parcours permet plus d'accumulation de litière. Ceci permet au sol de résister au tassement et de s'enrichir en matière organique. Wood et Blackburn (1984) ont noté dans les Rolling Plains du Texas, qu'après 20 années de pâturage intensif (4,6 ha/unité animale), de pâturage modéré (6,2 ha/unité animale) et de mise en défens, la quantité de résidus végétaux respectivement a été de 1,2; 4,5 et 12,5 T/ha; la teneur en matière organique du sol a été respectivement de 2,6; 3,7 et 4,3 %; et la densité apparente du sol respectivement a été de 1,8, 1,6 et 1,3 g/cm<sup>3</sup>. Gamougoun *et al.* (1984) ont signalé les mêmes tendances dans les hautes montagnes du Nouveau Mexique, avec la différence que le pâturage n'a duré que 3 années. Ils ont observé un taux de matière organique de 3,4, 1,99 et 0,89 %, respectivement pour la mise en défens, le pâturage modéré (23,13 ha/unité animale) et le pâturage intensif (17,35 ha/unité animale). Sabir et Roose (2007) ont montré que le pâturage réduit le taux de matière organique de 4,7 à 2,9 % dans un sol argilo-limoneux du Rif occidental au Maroc. Le reboisement et l'agroforesterie permettent d'augmenter les teneurs en matière organique à 4,4% et 3,2%, respectivement.

### Compaction du sol

La compaction du sol peut être définie comme étant le tassement des particules entre elles par des forces exercées à la surface, dont les conséquences sont une augmentation de la densité et une diminution de l'espace poral (Marshall et Holmes, 1979). Elle peut être appréciée par la mesure de la densité apparente (Laycock et Gifford, 1967), de la porosité (Willat et Pullar, 1983) et de la résistance à la pénétration et au cisaillement du sol (Federer *et al.*, 1961). Dans ce sens, plusieurs travaux ont montré que le surpâturage:

- Provoque le tassement du sol qui se manifeste par une augmentation de la densité apparente (Lull, 1959; Laycock et Gifford, 1967; Abdel-Magid *et al.*, 1987a) et une réduction de la porosité totale, essentiellement marquant les macropores (Alderfer et Robinson, 1947; Read, 1957; Willat et Pullar, 1983; Donkor *et al.*, 2002; Chaichi *et al.*, 2005),
- Augmente la résistance à la pénétration et au cisaillement (Federer *et al.*, 1961; Gifford *et al.*, 1977; Donkor *et al.*, 2002; Drewry *et al.*, 2004), et
- Perturbe mécaniquement les agrégats du sol et réduit leur stabilité (Knoll et Hopkins, 1959; Backman et Smith, 1974; Sabir et Roose, 2007).

**Tableau 1: Pression exercée par le sabot animal sur la surface du sol selon les espèces animales**

Espèces animales	Pression (kg/cm <sup>2</sup> )		Sources
	Stationnaire	En mouvement	
Chevaux	1,40	2,80-5,60	FAO (1956)
	1,25	2,50-5,20	Hamidouch (1988), Maroc
Bovins	1,68	2,36-6,72	Lull (1959), USA
Ovins	0,65	1,30-2,60	William et Pullar (1983), Australie
	0,83	1,66-3,32	
	0,65	-	Sabir (1994), Maroc

Les effets du piétinement sur le sol varient selon la charge animale (Willat et Pullar, 1983; Warren *et al.*, 1986a), le type de sol, la texture, la teneur en matière organique et l'humidité (Robinson et Alderfer, 1952; Vanhaveren, 1983; Du *et al.*, 2019), les conditions climatiques saisonnières (Warren *et al.*, 1986b) et le type de végétation (Wood et Blackburn, 1981; Blackburn, 1983). Les sols à texture fine sont plus susceptibles au compactage par le piétinement animal que les sols à texture grossière. Vanhaveren (1983) et Sabir *et al.* (2004) ont montré sous les mêmes intensités et durées de pâturage, que la densité apparente a augmenté davantage pour des sols à texture argileuse que pour des sols à texture sablo-limoneuse. La compaction du sol est d'autant plus importante que le pâturage est incontrôlé. Les lieux d'habitat ainsi que les chemins empruntés par les animaux sont des endroits à forte compaction (Brown et Schuster, 1969; Gifford and Hawkins, 1978; Valentin, 1983; Greenwood & McKenzie, 2001). Le tableau 2 donne quelques valeurs qui montrent l'effet du pâturage incontrôlé sur certaines caractéristiques du sol.

Si la compaction du sol par le piétinement animal est plus évidente dans les sols des parcours des zones humides, elle est variable dans les sols des parcours des zones arides et semi-arides. En effet, certains auteurs ont noté que le pâturage provoque le tassement du sol et augmente sa densité apparente (Reed et Peterson, 1961; Packer, 1953; Valentin, 1983; Greenwood et McKenzie, 2001). D'autres n'ont pas observé de variation de la densité apparente du sol entre les parcours pâturés et non pâturés (Daubenmire et Colwell, 1942; Meeuwig, 1965; Laycock et Conrad, 1967; Drewry *et al.*, 2004). Cette différence dans les résultats est probablement due à la variabilité des sols, de l'humidité et de la végétation. Dans ce sens, Laycock et Conrad (1967) signalent que le pâturage sur des sols humides engendre souvent leur compaction, alors que sur des sols secs, il n'a pas nécessairement le même effet.

D'autres auteurs, entre autres, Goodloe (1969), Savory (1978) et Savory et Parsons (1980), ont émis l'hypothèse que le pâturage en zones arides, par l'effet du piétinement, ameublisse la surface du sol, incorpore plus de matière organique et confère au sol une bonne structure.

Toutefois, certains travaux infirment cette hypothèse. Ainsi, Wood et Blackburn (1981), travaillant sur l'influence des systèmes de pâturage sur les caractéristiques de la

surface du sol dans les plaines ondulées du Texas (Texas Rolling Plains) n'ont pas observé de différence significative dans la densité apparente du sol mesurée sur les 3 premiers centimètres. Abdel-Magid *et al.* (1987b), dans les hautes plaines du Wyoming n'ont pas noté de différence significative, non plus, dans la densité apparente d'un sol limono-sableux entre des parcelles fortement pâturées (2,25 ha/unité animale), modérément pâturées (3 ha/unité animale) et légèrement pâturées (5,25 ha/unité animale). Valentin (1983) a noté, dans les terrains de parcours au nord du Sénégal, que plus on se rapproche des points d'eau plus le sol devient dense, mais contient plus de matière organique produite par les déjections des animaux. Sabir *et al.* (1998) ont observé dans un milieu aride, sur sol à texture équilibrée, que l'augmentation de la charge animale au-dessus de la charge d'équilibre (1 brebis/ha/an), entraîne une augmentation de la densité apparente du sol, notamment sur les deux premiers centimètres (2 cm). En effet la densité apparente est passée de 1 g/cm<sup>3</sup> pour le témoin (non pâturé) à 1,4 g/cm<sup>3</sup> pour une charge de 4 brebis/ha/an. La différence n'est pas significative entre la charge d'équilibre et la charge nulle (mise en défens). La résistance à la pénétration et au cisaillement a augmenté significativement sous des charges supérieures à 2 brebis/ha/an.

### Capacité de stockage en eau du sol

La capacité de stockage en eau d'un sol, pour une profondeur donnée, dépend essentiellement de sa texture et de sa structure. Ces deux caractéristiques déterminent la porosité totale du sol, souvent subdivisée en micro et en macroporosité. Pour un sol donné, la microporosité est étroitement liée à la capacité de stockage en eau et la macroporosité est liée à la capacité d'infiltration. La quantité d'eau emmagasinée dans un sol dépend de sa capacité d'infiltration et de stockage et du taux d'évapotranspiration (Hillel, 1984; Rosnoblet, 2002; Mermoud, 2006).

Les animaux, au pâturage, peuvent avoir des effets antagonistes sur la quantité d'eau emmagasinée dans le sol. Par le tassement des particules, ils réduisent la macroporosité et par conséquent diminuent la capacité d'infiltration de l'eau dans le sol. Mais dans certaines textures grossières, ils peuvent augmenter la microporosité et par conséquent améliorer la capacité de stockage en eau (Read, 1957). La réduction du couvert végétal par le broutage, engendre

**Tableau 2: Effet du pâturage sur certaines caractéristiques des sols**

Caractéristiques du sol	Pâturage incontrôlé	Sans pâturage	Texture du sol	Sources
Densité apparente (g/cm <sup>3</sup> )	1,70	1,30	L	Wood et Blackburn (1984)
	1,04	0,89	L	Willat et Pullar (1983)
	1,23	1,08	LA	McCarty et Mazurak. (1976)
	1,22	1,01	LS	Read (1957)
	1,10	1,10	SL	Bohn et Buckhouse (1985)
Porosité (%)	7,41	14,1	LS	Gifford <i>et al.</i> (1977)
Résistance à la pénétration (kg/cm <sup>2</sup> )	3,11	0,83		Gifford <i>et al.</i> (1977)
	2,65	0,90	ALS	Sabir (1994)
Résistance au cisaillement (kg/cm <sup>2</sup> )	0,65	0,48	LA	McCarty et Mazurak (1976)
	3,40	1,20	ALS	Sabir (1994)
Matière organique (%)	2,60	4,30	LS	Wood et Blackburn (1984)
	0,89	3,40	SL	Gamougoun <i>et al.</i> , (1984)
	2,90	4,70	AL	Sabir et Roose (2007)
Stabilité des macro-agrégats (%)	37,1	54,3	AL	Sabir et Roose (2007)

A: argileux, L: limoneux, S: sableux, LA: limono-argileux, LS: limono-sableux, ALS: argilo-sableux, SL: sablo-limoneux.

aussi une réduction du taux de transpiration, et par conséquent permet au sol de maintenir plus longtemps son eau (Blackburn, 1983; Freschet *et al.*, 2018).

Read (1957) a observé une diminution dans la macroporosité du sol, aucun changement dans sa capacité de stockage en eau suite à un pâturage intense. Rhoades *et al.* (1964) n'ont pas observé de changement dans la capacité de stockage en eau du sol dans des milieux pâturés avec différentes charges. Sabir (1994) a observé que le pâturage tasse la surface du sol sur les 2 premiers cm et réduit ainsi sa capacité de stockage en eau. L'humidité à la capacité au champ est passée de 21% dans une parcelle témoin sans pâturage à 17% sous pâturage intense (4 brebis/ha/an). Guo *et al.* (2020) ont observé que le pâturage dans le plateau du Qinghai-Tibet a réduit la capacité de stockage de l'eau dans le sol par rapport au témoin (absence de pâturage) par 24,5 ; 32,1 et 36,7%, respectivement pour un pâturage léger, modéré et fort.

Le tassement du sol par le piétinement animal peut avoir des effets négatifs sur la croissance de la végétation suite à une diminution de l'aération, une augmentation de la résistance du sol à la croissance racinaire et une diminution de l'infiltration de l'eau. Dans les sols à texture grossière à aération adéquate, un certain degré de compaction peut augmenter la rétention en eau et la teneur en nutriments, bénéfique à la végétation (Read, 1957; Gifford & Hawkins, 1978).

## EFFETS DU PÂTURAGE SUR LE COMPORTEMENT HYDROLOGIQUE DES SOLS

### Effets du pâturage sur l'infiltration de l'eau dans le sol

La capacité d'infiltration des sols de parcours est un paramètre clef du bilan hydrique du sol. Parmi les facteurs les plus importants qui l'affectent, l'état de surface du sol, la couverture végétale et le type d'aménagement (Rauzi, 1960). En effet, plusieurs recherches ont montré que l'état de surface contrôle largement les processus d'infiltration de l'eau (Free, 1940; Horton, 1942; Hillel, 1984; Imeson *et al.*, 1982; Sabir *et al.*, 2002). Pearse et Woolley (1936), Meeuwig (1970), McCalla *et al.* (1984) et Sabir *et al.* (2004) ont montré que le taux d'infiltration de l'eau dans le sol est fortement corrélé au couvert végétal. Ceci est dû au rôle protecteur que joue la végétation contre l'impact des gouttes de pluie et contre le piétinement.

Plusieurs travaux ont été consacrés à l'étude de l'impact du pâturage sur le comportement hydrologique du sol (Gifford et Hawkins, 1978 et 1979; Wood and Blackburn, 1981; Busby and Gifford, 1981; Casenave et Valentin,

1989; Sabir, 1994; Ali *et al.*, 2020; Guo *et al.*, 2020). Ces travaux ont révélé que la diminution de l'infiltration par le pâturage est attribuée à:

- La réduction du couvert végétal;
- La diminution des résidus végétaux;
- L'augmentation de la surface du sol nu; et
- La compaction de la surface du sol dû piétinement.

En effet, plusieurs auteurs, entre autres, Rauzi (1963), Weltz et Wood (1986), Sabir *et al.* (2004) et Guo *et al.* (2020), ont observé que la réduction du couvert végétal est fortement liée à la diminution de la capacité d'infiltration. Par contre, l'effet de la compaction sur le comportement hydrologique des sols n'est apparent que sur les sols à texture fine. Pour les sols à texture grossière, l'effet de la compaction n'est pas significatif et par conséquent son effet sur le comportement hydrologique est imperceptible. Sur les sols sablo-limoneux, certains auteurs n'ont pas noté de différence significative dans la capacité d'infiltration entre le témoin (non pâturé) et le pâturage modéré ou intense (Branson *et al.*, 1962; Thompson, 1968).

Le plus souvent, la capacité d'infiltration des sols de parcours est d'autant plus réduite que la charge animale est élevée (Dadkhah et Gifford, 1980; Blackburn, 1983; Warren *et al.*, 1986b; Sabir, 1994; Mapfumo *et al.*, 2000). Gifford et Hawkins (1978) rapportent que la capacité d'infiltration est réduite à 3/4 dans les sols des parcours modérément ou légèrement pâturés et à la moitié dans les sols des parcours fortement pâturés. Dans le Sud-Est des Etats Unis (précipitation annuelle de 1550 mm) sur sols à texture sablo-limoneuse, Linnartz *et al.* (1966), a observé que le pâturage intense sur 14 années, a réduit la capacité d'infiltration de 90 % par rapport aux sols des parcours non pâturés. Dans le Dakota du Nord, sur sol limoneux, Rauzi (1963), a constaté que dans les sols des parcours non pâturés, la capacité d'infiltration atteint le double de celle des sols des parcours modérément pâturés et le triple de celle des sols des parcours fortement pâturés. Sabir (1994) a montré dans un milieu aride que le pâturage à charge d'équilibre (1 brebis/ha/an) n'a pas d'effet significatif sur la capacité d'infiltration du sol. Par contre l'augmentation de la charge animale à 2, 4 et 8 brebis/ha/an a réduit respectivement la capacité d'infiltration du sol de 12; 27 et 52 % après 4 années de pâturage. Le tableau 3 donne quelques exemples de l'effet du pâturage sur la capacité d'infiltration de l'eau en fonction du type de sol et de la charge animale.

Cependant, certains auteurs indiquent que, le pâturage léger, notamment dans les zones arides et semi-arides, peut

**Tableau 3: Effet du pâturage et de la charge animale sur l'infiltration de l'eau dans le sol (mm/h)**

Type de sol	Charge animale			Sources
	Témoin	Modérée	Forte	
Sablo-limoneux	58,4	48,3	20,3	Gifford <i>et al.</i> (1983)
Limono-sableux	74,0	49,0	26,0	Weltz et Wood (1986)
Limoneux	299,0	251	129,0	Abdel-Majid et al. (1987b)
Limono-argileux	76,2	43,2	25,4	Rauzi et Hanson (1966)
Argilo-limoneux	109,2	61,0	38,1	Rauzi (1963)
Argilo-limono-sableux	96,4	65,2	45,4	Sabir (1994)
Argilo-limoneux	63,7	31,1	-	Sabir et Roose (2007)
Alluvions	-	30,5	30,5	Dortignac et Love (1961)
Granitique	-	109,2	71,1	Reed et Peterson (1961)

améliorer la capacité d'infiltration de l'eau dans le sol. Le piétinement animal brise la croûte de battance formée à la surface et incorpore beaucoup plus de matière végétale dans le sol (Valentin, 1983), et par conséquent améliore sa structure et sa porosité. La capacité d'infiltration se trouverait ainsi augmentée par rapport aux sols des parcours non pâturés (Goodloe, 1969; Savory, 1978; Savory et Parsons, 1980). Ainsi, Branson *et al.* (1962) ont noté que sur sol battant du Montana (Etats Unis), la capacité d'infiltration du sol passe de 7,6 mm/h pour le témoin (non pâturé) à 12,7 mm/h pour un pâturage léger. Gifford (1979) a noté aussi une augmentation de la capacité d'infiltration sous pâturage modéré sur sol sablo-limoneux battant du Sud-Est de l'Utah. En effet, elle est passée de 35,8 mm/h dans les sites non pâturés à 48,3 mm/h dans les sites modérément pâturés durant 7 années de pâturage. Ces auteurs n'ont pas donné de précision ni sur les niveaux de charge animale utilisés, ni sur la signification statistique des résultats.

Certains auteurs contestent cet effet positif du pâturage (Wood et Blackburn, 1981; Weltz et Wood, 1986; Warren *et al.*, 1986a et b; Abdel-Magid *et al.*, 1987b). La différence est probablement due à la nature des sols.

Ainsi, Abdel-Magid *et al.* (1987a), simulant le piétinement animal sur un sol limoneux, ont noté que l'augmentation de l'intensité du piétinement accroît le tassement du sol et réduit sa perméabilité. En effet la perméabilité est passée de 299 mm/h pour le témoin à 186 et 129 mm/h pour des échantillons de sol ayant reçu respectivement 8 et 32 coups d'un sabot artificiel, exerçant une pression au contact du sol de 1,2 kg/cm<sup>2</sup>.

#### Effets du pâturage sur le ruissellement et l'érosion des sols

Le ruissellement à la surface du sol pour une pluie donnée dépend essentiellement des facteurs qui régissent l'infiltration et qui sont principalement :

- La porosité non capillaire (macroporosité) de la couche superficielle du sol, 2 à 5 cm (Free *et al.*, 1940; Hillel, 1984);
- La stabilité structurale de la couche superficielle (Pepper et Morrissey, 1985, Merzouk, 1985);
- Le pourcentage du sol nu, non couvert par la végétation (Schwab *et al.*, 1966, Sabir *et al.*, 2004); et
- La couverture pierreuse (Edwards *et al.*, 1984; Dunn et Mehuys, 1984; Valentin and Casenave, 1992; Mazour et Roose, 2001).

L'apparition du ruissellement sur un sol n'a lieu que lorsque les abstractions initiales (interception, déficit hydrique à la saturation du sol, remplissage des dépressions de surface) sont satisfaites et que la saturation en eau et l'étanchéité de la surface (surface sealing) ont atteint des degrés tels que la capacité d'infiltration devient plus faible que l'intensité de pluie (Schwab *et al.*, 1966; Inoubli, 2016).

Pour un sol nu, les abstractions initiales et la capacité d'infiltration sont relativement plus faibles que pour un sol couvert de végétation. Un sol nu participe beaucoup plus au ruissellement qu'un sol couvert (Schwab *et al.*, 1966; Inoubli, 2016). Le couvert végétal protège le sol contre l'impact des gouttes de pluie, prévient la formation d'une croûte de battance, et donne au sol une bonne structure et une bonne perméabilité (Nahal, 1975; Sabir *et al.*, 2004).

L'apparition du ruissellement sur les sols de parcours résulte essentiellement du tassement du sol (Alderfer et

Robinson, 1947; Blackburn, 1983; Warren *et al.*, 1986b) et de la réduction du couvert végétal (Thompson, 1968; Hofmann et Ries, 1991; Sabir, 1994).

De manière générale, le pâturage intensif réduit la capacité d'infiltration du sol et augmente le débit et la fréquence du ruissellement (Hofmann et Ries, 1991). Le pâturage contrôlé augmente la production en eau des bassins versants, mais réduit la production en sédiments. Par contre, le surpâturage, en réduisant la couverture végétale du sol, augmente le ruissellement et la perte en sol et détériore la qualité de l'eau (Blackburn, 1983; Hofmann et Ries, 1991; Sabir et Roose, 2007).

Le ruissellement sur les sols de parcours est d'autant plus important que le niveau de charge animale est élevé. Il est plus fréquent et plus concentré dans le temps (débit élevé) sur les sols fortement pâturés que sur les sols légèrement ou non pâturés (Thompson, 1968; Blackburn, 1975; Sanjari *et al.*, 2009).

La réduction du couvert végétal, protecteur du sol par le pâturage et l'augmentation du ruissellement qui s'en suit, provoquent une érosion du sol d'autant plus prononcée que le niveau de charge animale est élevé (Thompson, 1968; Dadkhah et Gifford, 1980). La perte en sol et la dégradation spécifique sur les sols fortement pâturés sont plus élevées que dans les sols légèrement ou non pâturés (Thompson, 1968; Hofmann et Ries, 1991; Buckhouse et Gifford, 1976; Puigdefabregas *et al.*, 2005).

En effet, le rôle du couvert végétal dans la protection du sol contre l'érosion est très important. Osborn (1954) rapporte que la couverture végétale est le facteur primordial dans la protection du sol contre l'effet splash des gouttes de pluie. Hofmann et Ries (1991) et Sabir et Roose (2007) ont montré que l'érosion des sols de parcours est fortement corrélée, positivement avec la surface du sol nu et négativement avec la couverture de litière. La perte en sol (A), le ruissellement (R), et le rapport A/R sont négativement corrélés au couvert végétal (Hofmann *et al.*, 1983). Quand le sol est dépourvu de sa couverture protectrice, le ruissellement est favorisé et l'érosion apparaît. Cette dernière démarre par des formes non spectaculaires (en nappe) pour atteindre des manifestations dangereuses (ravinement, badland) si le processus n'est pas arrêté (Packer, 1953; Schwab *et al.*, 1966; Nahal, 1975; Roose, 1994).

#### CONCLUSION

Les impacts du pâturage sur le couvert végétal, l'état de surface et les propriétés hydrodynamiques du sol dépendent, d'une part de la nature du milieu (sol, végétation, climat), et d'autre part de l'intensité et la fréquence du pâturage.

Tous les auteurs signalent que le pâturage réduit la couverture végétale du sol. Cette réduction est d'autant plus prononcée que le niveau de charge animale est élevé. Les impacts sur la structure, la composition et l'étendue de la couverture végétale sont très nettes. Plus l'intensité du pâturage est forte, plus le couvert végétal est réduit, plus sa composition floristique est faible. Par conséquent les espèces appétibles sont les plus affectées, au contraire les espèces ligneuses et de mauvaise palatabilité deviennent plus fréquentes, et la qualité fourragère du parcours est détériorée. A long terme, la qualité du couvert végétal régresse et sa productivité fourragère diminue.

Dans les écosystèmes pastoraux humides, il est montré que le pâturage tasse la surface du sol d'autant plus que la charge animale est élevée. Ceci se traduit par une augmentation de la densité apparente du sol et une réduction de l'espace poral nécessaire à la circulation de l'air et de l'eau. De plus le tassement associé à une réduction du couvert végétal se traduit par une diminution de la capacité d'infiltration du sol et une augmentation de la production en sédiments. L'érosion des sols se trouve ainsi favorisée. Par contre, dans les zones arides, les études de l'effet du pâturage sur les caractéristiques du sol montrent des résultats variables. Certains travaux ont montré que le sol devient plus tassé quand la charge animale est élevée. D'autres ont signalé que le piétinement animal n'a pas d'effet sur le tassement du sol. Les différences sont expliquées par le type de sol, l'humidité et la nature et le type de pâturage. Le pâturage léger ou modéré, ne dépassant pas les possibilités de production de biomasse, et caractérisé par une circulation adéquate (peu fréquente) des animaux permet de :

- Maintenir un couvert végétal fourni et diversifié à la surface du sol. La régénération des espèces, notamment palatables, est assurée durablement;
- Éviter le tassement du sol, ce qui permet de garder une bonne porosité et donc une bonne capacité d'infiltration. De plus le sol devient riche en matière organique, plus cohérent et moins érodible, et sa stabilité structurale est améliorée. En outre, le ruissellement reste faible et peu fréquent. Ainsi, les phénomènes d'érosion sont peu apparents;
- Utiliser durablement les terrains de parcours.

## RÉFÉRENCES

- Abdel-Magid, A.H., Trlica, M.J., Hart, R.H. (1987a). Soil and vegetation responses to simulated trampling. *J. Range Manage.*, 40: 303-306.
- Abdel-Magid, A.H., Trlica, M.J., Hart, R.H. (1987b). Soil bulk density and water infiltration as affected by grazing systems. *J. Range Manage.*, 40: 307-309.
- Alaoui, M. (1985). Contribution à l'étude de l'interface ovins-végétation sous un système continu de pâturage: Effet d'un pâturage continu à différents niveaux de charge au printemps et en été sur les steppes à armoise en Haute Moulouya. Mémoire de 3ème cycle Agronomie. Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat, Maroc.
- Alderfer, R.B., Robinson, R.R. (1947). Runoff from pastures in relation to grazing intensity and soil compaction. *J. Am. Soc. Agron.*, 39: 948-958.
- Ali, A., Usman, M., Nangere, M.G. (2020). Study of cattle trampling and its effect on soil properties and sorghum productivity in parts of Yobe State, Nigeria. *Asian Plant Research Journal*, 4: 34-40.
- Amiri, F., Ariapour, A., Fadai, S. (2008). Effects of livestock grazing on vegetation composition and soil moisture properties in grazed and non-grazed range site. *Journal of Biological Sciences*, 8: 1289-1297.
- Balgh, D.F., Malecheck, J.C. (1985). Cattle trampling of crested wheatgrass under short duration grazing. *J. Range Manage.*, 38: 226-226.
- Bechchari, A., El Aich, A., Mahyou, H., Baghdad, B., Bendaou, M. (2014). Étude de la dégradation des pâturages steppiques dans les communes de Maâtarka et Béni Mathar (Maroc oriental). *J. Mater. Environ. Sci.*, 5: 2572-2583.
- Bourbouze, A., Qarro, M. (2000). Rupture: nouveaux enjeux, nouvelles fonctions, nouvelle image de l'élevage sur parcours. Montpellier. *CIHEAM Options Méditerranéennes: Série A. Séminaires Méditerranéens*, 39: 185-189.
- Bowns, J.E., Bagley, C.F. (1986). Vegetation responses to long-term sheep grazing on mountain ranges. *J. Range Manage.*, 39: 431-434.
- Branson, F.A., Miller, R.F., Mcqueen, I.S. (1962). Effect of contour furrowing, grazing intensities, and soil moisture, and vegetation near Ft. Peck, Montana. *J. Range Manage.*, 15: 151-158.
- Brown, J.W., Schuster, J.L. (1969). Effects of grazing on hardland site in the southern High Plains. *J. Range Manage.*, 22: 418-423.
- Bukhouse, J.C., Gifford, G.F. (1976). Sediment production and infiltration rates as affected by grazing and debris burning on chained and seeded pinyon-Juniper. *J. Range Manage.*, 29: 83-85.
- Busby, F.E., Gifford, G.F. (1981). Effects of livestock grazing on infiltration and erosion rates measured on chained and unchained pinyon-juniper sites in southeastern Utah. *J. Range Manage.*, 34: 400-405.
- Casenave, A., Valentin, C. (1992). A runoff capability classification system based on surface features criteria in semi-arid areas of West Africa. *J. Hydrology*, 130: 231-249.
- Casenave, A., Valentin, C. (1989). Les états de surface de la zone sahélienne: Influence sur l'infiltration. Col. Didactiques, Ed(s) de l'ORSTOM, Paris.
- Chaichi, M.R., Saravi, M.M., Arash, M. (2005). Effects of livestock trampling on soil physical properties and vegetation cover (Case Study: Lar Rangeland, Iran). *Int. J. Agric. Biol.*, 7: 1-5.
- Dadkhah, M., Gifford, G.F. (1980). Influences of vegetation, rock cover and trampling on infiltration rates and sediment production. *Water Resources Bull.*, 16: 979-986.
- Descroix, L., Viramontes, D., Anaya, E., Poulenard, J., Gonzalez Barrios, J.L. (2000). L'impact du surpâturage et du déboisement sur l'érosion des sols dans la Sierra Madre occidentale (nord-ouest du Mexique). *Bulletin Réseau Erosion*, 20: 218-231.
- Djibo, I., Mamman, M., Issa, C., Sarr, O., Bakhoum, A., Mari-chatou, H., Akpo, E.L., Assane, M. (2018). Caractéristiques de la végétation du parcours Gadoudhé, dans la commune rurale de Fabidji (Niger). *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 12: 1151-1163.
- Donkor, N.T., Gedir, J.V., Hudson, R.J., Bork, E.W., Chanasyk, D.S., Naeth, M.A. (2002). Impacts of grazing systems on soil compaction and pasture production in Alberta. *Canadian Journal of Soil Science*, 82(1).
- Dortignac, E.J., Love, L.D. (1961). Infiltration studies on ponderosa pine range of Colorado. Rocky Mont. For. Range Exp. Stat.; Fort Collins, Colorado; For. Service, USDA.
- Drewry, J.J., Paton, R.J., Monaghan, R.M. (2004). Soil compaction and recovery cycle on a Southland dairy farm: implications for soil monitoring. *Aust. J. Soil Res.*, 42:851-856.
- Du, Y., Zhou, G., Guo, X., Cao, G. (2019). Spatial distribution of grassland soil organic carbon and potential carbon storage on the Qinghai Plateau. *Grassl. Sci.*, 65: 141-146.
- El Bare, B. (1985). Contribution à la connaissance des pâturages à armoise: utilisation par les ovins et impacts du broutage sous différents niveaux de charge. Mém. Assistanat, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat, Maroc.
- Ellison, L. (1960). Influence of grazing on plant succession of rangelands. *Botanical Rev.*, 26:1-69.
- Escadafal, R. (1989). Caractérisation de la surface des sols arides par observations de terrain et par télédétection. Applications: Exemple de la région de Tataouine (Tunisie). Coll. Études et thèses, Ed(s) de l'ORSTOM.
- Fiedler, F.R., Frasier, G.W., Ramirez, J.A., Ahuja, L.R. (2002). Hydrologic response of grasslands: Effects of grazing, interactive infiltration, and scale. *Journal of Hydrologic Engineering*, July-August, 293-301.
- Frame, J. (1971). Fundamentals of grassland management. Pt. 10. The grazing animal. *Scottish Agr.*, 50: 28-44.
- Freschet, G.T., Violle, C., Roumet, C., Garnier, E. (2018). Interactions entre le sol et la végétation: structure des communautés de plantes et fonctionnement du sol. Les sols au cœur de la zone critique: écologie (Ed(s) P. Lemanceau & M. Blouin), pp. 83-99. ISTE editions, London, UK.

- Gamougoun, N.D., Smith, R.P., Wood, M.K., Pieper, R.D. (1984). Soil, vegetation, and hydrologic responses to grazing management at Fort Stanton, New Mexico. *J. Range Manage.*, 36: 538-541.
- Gamoun, M., Ouled Belgacem, A., Hanchi, B., Neffati, M., Gillet, F. (2012). Effet du pâturage sur la diversité floristique des parcours arides du Sud Tunisien. *Rev. Écol. (Terre Vie)*, 67: 271-282.
- Gifford, G.F., Hawkins, R.H. (1978). Hydrologic impact of grazing on infiltration: A critical review. *Water Resour. Res.*, 14: 305-313.
- Gounot, M. (1969). Méthode d'étude quantitative de la végétation. *Bulletin mensuel de la Société linnéenne de Lyon*, 7: 107-108.
- Greenwood, K.L., McKenzie, B.M. (2001). Grazing effects on soil physical properties and consequences for pastures: a review. *Aust. J. Exp. Agric.*, 41:1231-1250.
- Grosbellet, C. (2008). Evolution et effets sur la structuration du sol de la matière organique apportée en grande quantité. Thèse de Doctorat Ès Sciences Agronomiques. Université d'Angers, 2008.
- Guo, X., Dai, L., Li, Q., Qian, D., Cao, G., Zhou, H., Du, Y. (2020). Light grazing significantly reduces soil water storage in Alpine Grasslands on the Qinghai-Tibet Plateau. *Sustainability*, 12: 2523.
- Hamel, T., Boulemtafes, A., Bellili, A. (2019). L'impact de sur-pâturage sur les subérasies de la péninsule de l'Edough (Nord-Est algérien). *Geo-Eco-Trop.*, 43: 119-128.
- Hamidouch, M. (1988). Mesure des forces à l'interface des pieds d'un quadrupède avec le sol: Utilisation de la plateforme dynamométrique. Mémoire 3ème cycle, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat, Maroc.
- Hanks, R.J. (1965). Estimating infiltration from soil moisture properties. *J. Soil. and Water Conser.*, 20: 49-51
- Hillel, D. (1984). L'eau et le sol. Principes et processus physiques. Cabay, Louvain-La-Neuve.
- Hiltbrunner, D., Schulze, S., Hagedorn, F., Schmidt, M.W.I., Zimmermann, S. (2012). Cattle trampling alters soil properties and changes soil microbial communities in a Swiss sub-alpine pasture. *Geoderma*, 170:369-377.
- Hofmann, L.R., Ries, R.E. (1991). Relationship of soil and plant characteristics to erosion and runoff on pasture and range. *J. Soil. and Water Conser.*, 143-147.
- Hofmann, L.R., Ries, R.E., Gilley, J.E. (1983). Relationship of runoff and soil loss to ground cover of native and reclaimed grazing land. *Agron. J.*, 75: 599-602.
- Holechek, J. (1980). Livestock grazing impacts on rangeland ecosystems. *J. Soil and Water Conser.*, 162-164.
- Inoubli, N. (2016). Ruissellement et érosion hydrique en milieu méditerranéen vertique: approche expérimentale et modélisation. Thèse de doctorat, Institut national d'études supérieures agronomiques de Montpellier et Institut National Agronomique de Tunisie. Collège Doctoral du Languedoc Roussillon, Sup Agro, Montpellier.
- Jalilvand, H., Tamartash, R., Heydarpour, H. (2007). Grazing impact on vegetation and some soil chemical properties in Kojour rangelands, Noushahr, Iran. *Journal of Rangeland*, 1: 53-66.
- Jeffries, D.L., Klopatek, J.M. (1987). Effects of grazing on the vegetation of the blackbrush association. *J. Range Manage.*, 40: 390-392.
- Kakinuma, K., Takatsuki, S. (2008). Change in plant communities by grazing in north Mongolia and land assessment of herders. Proceedings of the 21<sup>th</sup> International Grassland Congress and 8<sup>th</sup> International Rangeland Congress in Hohhot, June 28-July 6, 2008, China, pp: 493-493.
- Laycock, W.A., Conrad, P.W. (1967). Effect of grazing on soil compaction as measured by bulk density on high elevation cattle range. *J. Range Manage.*, 20: 136-140.
- Laycock, W.A., Buchanan, H., Krueger, W.E. (1972). Three methods of determining diet, utilization, and trampling damage on sheep ranges. *J. Range Manage.*, 25: 352-356.
- Le Bissonnais, Y. (1996). Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal Soil Science*, 47: 425-437.
- Loiseau, P., Sebillotte, M. (1972). Etude et cartographie des pâturages du Maroc oriental. Tome 1, Problèmes généraux. MARA Rabat et ERES-SCET Paris.
- Lull, H.W. (1959). Soil compaction on forest and rangelands. USDA Forest Service. Misc. Pub. N° 768.
- Mapfumo, E., Chanasyk, D.S., Baron, V.S., Naeth, M.A. (2000). Grazing impacts on selected soil parameters under short-term forage sequences. *J. Range Manage.*, 53: 466-470.
- Mazour, M., Roose, E. (2002). Influence de la couverture végétale sur le ruissellement et l'érosion des sols sur parcelles d'érosion dans des bassins versants du Nord-Ouest de l'Algérie. *Bul. Réseau Erosion*, 21: 320-330.
- McGregor, H.V., Dupont, L., Stuut, J.B.W., Kuhlmann, H. (2009). Vegetation change, goats and religion: a 2000-year history of land use in southern Morocco. *Quaternary Science Reviews*, 28: 1434- 1448.
- Mermoud, A. (2006). Etat de l'eau dans le sol. Cours de physique du sol. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse.
- Moir, W.H., Ludwig, J.A., Scholes, R.T. (2000). Soil erosion and vegetation in grasslands of the Peloncillo Mountains, New Mexico. *Soil Science Society of America Journal*, 64:1055-1067.
- Nahal, I. (1975). Principes de la conservation des sols. Collection de géographie applicable. Masson, Paris.
- Ndotam Tatila, I., Reounodji, F., Lumande Kasali, J., Diaouangana, J. (2017). Evaluation de la diversité floristique en herbacées dans le Parc National de Manda au Tchad. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 11: 1484-1496.
- Osborn, B. (1954). Effectiveness of cover in reducing soil splash by raindrop impact. *J. Soil and Water Conser.*, 9: 70-76.
- Packer, P.E. (1953). Soil stability requirements for the Gollatin elk winter range. *J. Wildlife Manage.*, 27: 401-410.
- Peres, G., Cluzeau, D., Menasseri, S., Soussana, J.F., Bessler, H., Engels, C., Habekost, M., Gleixner, G., Weisser, A., Scheu, S., Eisenhaur, N. (2013). Mechanisms linking plant community properties to soil aggregate stability in an experimental grassland plant diversity gradient. *Plant and soil*, 373: 285-299.
- Pietola, L., Horn, R., Yli-Hallac, M. (2005). Effects of trampling by cattle on the hydraulic and mechanical properties of soil. *Soil and Tillage Research*, 82: 99-108.
- Puigdefabregas, J. (2005). The role of vegetation patterns in structuring runoff and sediment fluxes in drylands. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30: 133-147.
- Quinn, J.A., Hervey, D.F. (1970). Trampling losses and travel by cattle on sandhills range. *J. Range Manage.*, 23: 50-55.
- Rauzi, F. (1960). Water intake studies on range soils at three locations in the northern Plains. *J. Range Manage.*, 4: 179-184.
- Rauzi, F. (1963). Water intake and plant composition as affected by differential grazing on rangeland. *J. Soil and Water Cons.*, 114-116
- Rauzi, F., Hanson, C.L. (1966). Water intake and runoff as affected by intensity of grazing. *J. Range Manage.*, 19: 341-356.
- Read, R.A. (1957). Effect of livestock concentration on surface soil porosity within shelterbelts. *J. Forestry*, 55: 529-531.
- Reardon, P.O., Merrill, L.B. (1976). Vegetative responses under various grazing management systems in the Edwards Plateau of Texas. *J. Range Manage.*, 29: 195-198.
- Reed, M.J., Peterson, R.A. (1961). Vegetation, soil, and cattle responses to grazing on northern Great Plains range. USDA Tech. Bull. 1252.
- Rey, F., Ballais, J.L., Marre, A., Rovéra, G. (2004). Rôle de la végétation dans la protection contre l'érosion hydrique de surface. *C. R. Geoscience*, 336: 991-998.
- Rhoades, E.D., Locke, L.F., Taylor, H.M., Mcilvain, E.H. (1964). Water intake on a sandy range as affected by 20 years of differential cattle stocking rates. *J. Range Manage.*, 17: 185-190.
- Roose, E. (1994). Gestion de la biomasse et de la fertilité des sols. Bulletin Pédologie n° 70. FAO, Rome.

- Roose, E. (2017). Influences du climat et du couvert végétal sur les pertes en nutriments par érosion et drainage en Afrique occidentale. In Roose (Edit): Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens-Contribution à l'agroécologie. Editions IRD.
- Rosnoblet, E. (2002). Dynamique du bilan hydrique parcellaire au sein de l'espace rural-conséquences sur les transferts hydrologiques. Expérimentation, Sciences de la Terre. INAPG (AgroParisTech), p 30.
- Rossignol, N. (2006). Hétérogénéité de la végétation et du pâturage: conséquences fonctionnelles en prairies naturelle. Thèse de doctorat, Université Rennes 1, Rennes, France.
- Sabir, M. (1994). Etude des impacts du pâturage sur les propriétés physiques du sol dans un périmètre d'amélioration pastorale arid (Aarid, Haute Moulouya), Maroc. Thèse Es Sciences Agronomiques, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat, Maroc.
- Sabir, M., Barthès, B., Roose, E. (2004). Recherche d'indicateurs des risques de ruissellement et d'érosion sur les principaux sols des montagnes méditerranéennes du Rif occidental (Maroc). *Sécheresse*, 15:105-110.
- Sabir, M., Merzouk, A., Berkat, O. (1998). Effet du pâturage sur l'état de surface, l'infiltrabilité et la détachabilité du sol dans un milieu pastoral aride (Aarid, Haute Moulouya, Maroc). XIII<sup>ème</sup> Congrès International du Génie Rural, 2-6 Février 1998, ANAFID, Rabat.
- Sabir, M., Qarro, M., Berkat, O., Merzouk, A. (1992). Effets de la charge animale sur le développement de la végétation dans un milieu steppique: Aarid, Haute Moulouya. *Ann. Rech. For. Maroc.*, 26: 59-67.
- Sabir, M., Roose, E. (2017). Dégradation et restauration des sols par l'élevage au Maroc. Chapitre in Roose (Edit). Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens-Contribution à l'agroécologie. Editions IRD.
- Sanjari, G., Yu, B., Ghadiri, H., Ciesiolka, C. A., Rose, C. W. (2009). Effects of time-controlled grazing on runoff and sediment loss. *Soil Research*, 47: 796-808.
- Schwab, G.O., Frevert, R.K., Edminster, T.W., Barnes, K.K. (1966). Soil and water conservation engineering. 2<sup>o</sup> edition; John Willey & Sons; New York.
- Thompson, J.R. (1968). Effect of grazing on infiltration in a western watershed. *J. Soil and Water Conser.*, March-April: 63-65.
- Thurow, T.L., Blackburn, W.H., Taylor, C.A. (1988). Some vegetation responses to selected livestock grazing strategies, Edwards Plateau, Texas. *J. Range Manage.*, 41: 108-114.
- Tukel, T. (1984). Comparison of grazed and protected mountain steppe rangeland in Ulukisla, Turkey. *J. Range Manage.*, 37: 133-135.
- Valentin, C. (1983). Effets du pâturage et du piétinement sur la dégradation des sols autour des points d'eau artificiels en région sahélienne (Ferro, Nord Sénégal). A.C.C. Lutte contre l'aridité en milieu tropical, Labo. Pédologie, ORSTOM.
- Valentin, C, Casenave, A. (1992). Infiltration into sealed soils as influenced by gravel cover. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56: 1667-1673
- Warren, S.D., Blackburn, W.H., Taylor, C.A. (1986b). Effects of season and stage of rotation cycle on hydrologic condition of rangeland under intensive rotation grazing. *J. Range Manage.*, 39: 500-503.
- Warren, S.D., Mevill, M.B., Blackburn, W.H., Garza M.E. (1986a). Soil response to trampling under intensive rotation grazing. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50: 1336-1341.
- Weeda, W.C., During, C. (1987). Effects of grazing management on herbage production and botanical composition of grasslands Nui ryegrass paspalum white clover pasture. 1. Effect of intensity of grazing by cattle in different seasons. *New Zealand J. of Agric. Res.*, 30: 423-430.
- West, N.E., Provenza, F.D., Johnson, P.S., & Owens, M.K. (1984). Vegetation change after 13 years of livestock grazing exclusion on sagebrush semi desert in west central Utah. *J. Range Manage.*, 37: 262-264.
- Willat, S.T. (1987). Influence of aggregate size and water content on compactability of soil using short time static loads. *J. Agric. Engine. Res.*, 37: 107-115.
- Willat, S.T., Pullar, D.M. (1983). Changes in soil physical properties under grazed pastures. *Aust. J. Soil. Res.*, 22: 343-348.
- Wood, M.K., Blackburn, W.H. (1981). Grazing systems: Their influence on infiltration rates in the Rolling Plains of Texas. *J. Range Manage.*, 34: 331-335.
- Wood, M.K., Blackburn, W.H. (1984). Vegetation and soil responses to cattle grazing systems in the Texas Rolling Plains. *J. Range Manage.*, 37: 303-308.
- Young, A. (1987). The potential of agroforestry for soil conservation and sustainable land use. ICRAF Reprint N °9, Nairobi, Kenya.